

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky



Návrh konceptu strojní části malé vodní elektrárny
a její energetické hodnocení

Concept and Energy Audit of Small Water Power
Plant

Student: Pavel Richtár
Vedoucí práce: Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.

Ostrava 2009

Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Richtár**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3904R016 Technika tvorby a ochrany životního prostředí
Specializace: 70 Technika tvorby a ochrany životního prostředí
Téma: Návrh konceptu strojní části malé vodní elektrárny a její energetické
hodnocení
Concept and Energy Audit of Small Water Power Plant

Zásady pro vypracování:

Zpracujte návrh a energetické hodnocení výstavby malé vodní elektrárny v dané lokalitě (v rozsahu platné legislativy).

Práce bude obsahovat:

- analýzu energetického využití
- návrh a analýza variant využití hydropotenciálu dané lokality
- rozpracování vybraného řešení

Seznam doporučené odborné literatury:

GABRIEL,P, ČIHÁK, F,KALANDRA, P. *Malé vodní elektrárny*. Praha 1998, ISBN 80-01-01812-1
MELICHAR,J,VOJTEK,J, BLAHAK,J. *Malé vodní turbíny, konstrukce a provoz*. Praha 1998, ISBN 80-01-01808-0
KALTSCHMITT,M,STREICHER,W,WIESE,A. *Renewable Energy Technology*
,Economics and Environment,Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, ISBN 978-3-540-70947-3
Firemní literatura - podklady výrobců vodních turbín


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.**

Datum zadání: 29.09.2008

Datum odevzdání: 22.05.2009




prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu. V bakalářské práci jsem se souhlasem pana Viktora Laiky (<http://mve.energetika.cz/>) použil obrázky turbín, kterých je autorem.

V Ostravě 22.05.2009

.....

Pavel Richtár

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Pavel Richtár
Rokycanova 266
Frýdek-Místek, 738 01

V Ostravě 22.05.2009

.....

Pavel Richtár

Anotace bakalářské práce

RICHTÁR, Pavel. *Návrh konceptu strojní části malé vodní elektrárny a její energetické hodnocení*. Ostrava: Katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009. 49 s. Bakalářská práce, vedoucí: Szeliga, Z.

Bakalářská práce obsahuje teoretický rozbor výroby elektrické energie v podmínkách MVE. Je proveden popis vodních turbín použitelných pro podmínky zadání. Je vybrána vhodná turbína a určena její účinnost na základě univerzální charakteristiky turbíny jednotkových parametrů. Práce dále obsahuje výpočet instalovaného výkonu MVE a roční zisk plynoucí z provozování MVE. V závěru je stanovena orientační doba návratnosti investičních nákladů na výstavbu MVE.

Annotation of Bachelor Thesis

RICHTÁR, Pavel. *Concept and Energy Audit of Small Water Power Plant*. Ostrava: Department of Power Engineering, Faculty of Mechanical Engineering VŠB - Technical University of Ostrava, 2009. 49 p. Thesis, head: Szeliga, Z.

This thesis contains theoretical analysis production of electric power in small water power plants. Water turbines are described on usage the proper correct conditions and situations. The best turbine has been chosen and its effectiveness is founded on universal characteristics of turbine which has unitary parameters. This thesis contains a calculation of installed capacity and yearly return from operation of small water power plant. The approximate period of return investment costs for construction small water power plant is founded at the end of this thesis.

Obsah

Použitá označení, pojmy a zkratky	7
1 Úvod.....	10
2 Využívání vodní energie	10
2.1 Rozdělení vodních elektráren	11
2.2 Malé vodní elektrárny	12
2.3 Vodohospodářské řešení malé vodní elektrárny	13
2.4 Projektové řešení malé vodní elektrárny	14
3 Vodní turbíny	17
3.1 Rozdělení vodních turbín, turbínová rovnice	17
3.2 Základní popis vybraných typů vodních turbín	21
4 Návrh turbíny pro zadané parametry toku	26
4.1 Základní popis výpočtu výkonu dle odtokové křivky	26
4.2 Vlastní výpočet možného výkonu zařízení	29
4.3 Turbíny vhodné pro podmínky zadání.....	31
4.4 Výběr turbíny a jeho zdůvodnění.....	36
4.5 Stanovení účinnosti zvolené turbíny	37
4.6 Výpočet instalovaného výkonu MVE.....	41
4.7 Výpočet ročního množství vyrobené elektrické energie.....	42
5 Návrh investic	44
5.1 Koeficient ročního využití instalovaného výkonu MVE	44
5.2 Náklady na výstavbu MVE.....	44
5.3 Stanovení doby návratnosti investic	45
5.4 Dotace	46
6 Závěr	46
7 Použité zdroje	47
8 Přílohy.....	49

Použitá označení, pojmy a zkratky

Označení	Název	Jednotka
A	- vzdálenost hodnot na ose spádu v diagramu	$[mm]$
B	- vzdálenost hodnot na ose průtoku v diagramu	$[mm]$
C	- vzdálenost hodnot na ose průtoku v diagramu	$[mm]$
D_m	- průměr oběžného kola modelové turbíny	$[m]$
D_s	- průměr oběžného kola skutečné turbíny	$[m]$
E	- polohová měrná energie	$[J \cdot kg^{-1}]$
$E_{int.}$	- energie vyrobená v určitém časovém intervalu	$[J], [Wh]$
$E_{skut.}$	- skutečná vyrobená energie	$[J], [Wh]$
$E_{teor.}$	- teoretická měrná energie	$[J \cdot kg^{-1}]$
$E_{teor. využ.}$	- teoretická využitelná energie	$[J], [Wh]$
H	- spád	$[m]$
H_b	- hrubý spád	$[m]$
H_m	- spád modelové turbíny	$[m]$
H_s	- spád skutečné turbíny	$[m]$
M	- moment síly	$[N \cdot m]$
$Náklady$	- celkové investiční náklady	$[Kč]$
$Návratnost$	- návratnost investic	$[roky]$
P	- výkon	$[W], [hp]$
$P_{inst.}$	- instalovaný výkon	$[W], [hp]$
P_s	- skutečný výkon (soustrojí)	$[W], [hp]$
P_t	- teoretický výkon na hřídeli turbíny	$[W], [hp]$
$P_{teor.}$	- teoretický výkon hydroenergetického zdroje	$[W], [hp]$
$P_{teor., využ.}$	- teoreticky využitelný výkon hydroenergetického zdroje	$[W], [hp]$
$Q_{asan.}$	- asanační průtok	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$Q_{char.}$	- poměr průtoků v univerzální charakteristice turbíny	$[1]$
$Q_{max.}$	- maximální průtok turbínou	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$Q_{min.}$	- minimální průtok turbínou	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$Q_{opt.}$	- optimální průtok turbínou	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$Q_{stř.}$	- střední průtok (v daném časovém intervalu)	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$Q_{využ.}$	- využitelný průtok	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
R	- vzdálenost od osy rotace	$[m]$
$Využití P_{inst.}$	- roční využití instalovaného výkonu	$[Wh \cdot W_e^{-1}]$

Označení	Název	Jednotka
$Zisk_{rok}$	- roční zisk	$[Kč]$
c	- absolutní rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
c_u	- obvodová složka absolutní rychlosti	$[m \cdot s^{-1}]$
g	- tíhové (gravitační) zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
k_t	- násobný součinitel	$[1]$
k_v	- koeficient ročního využití instalovaného výkonu	$[1]$
n	- otáčky turbíny	$[ot \cdot min^{-1}]$
n_s	- specifické otáčky turbíny	$[ot/min./m/hp]$
u	- obvodová rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
w	- relativní rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
z	- měřítko osy (základ logaritmu)	$[1]$
Φ	- průměr oběžného kola	$[m]$
α	- úhel	$[^\circ], [rad]$
β	- úhel	$[^\circ], [rad]$
η_g	- elektrická účinnost generátoru	$[\%], [1]$
η_h	- hydraulická účinnost	$[\%], [1]$
η_m	- modelová účinnost turbíny	$[\%], [1]$
η_p	- účinnost převodu	$[\%], [1]$
η_s	- skutečná účinnost turbíny	$[\%], [1]$
η_t	- celková účinnost turbíny	$[\%], [1]$
η_{tr}	- elektrická účinnost blokového transformátoru	$[\%], [1]$
ρ	- hustota vody	$[kg \cdot m^{-3}]$
τ	- časový interval, doba provozu	$[hod.]$
ω	- úhlová rychlost	$[rad \cdot s^{-1}]$

Použité pojmy a zkratky

abrazé	- narušování celistvosti (obrušování) povrchu v důsledku působení proudu vody, částic ve vodě obsažených nebo proudu částic jiné látky
Coriolisova síla	- síla působící na tělesa, která se pohybují v rotující neinerciální vztažné soustavě (soustava, v níž neplatí 1. a 2. Newtonův pohybový zákon nebo výslednice sil působících na těleso je nulová, avšak těleso se pohybuje s nenulovým zrychlením) tak, že se mění jejich vzdálenost od osy otáčení. Coriolisova síla má směr kolmý ke spojnici těleso – osa otáčení a způsobuje stáčení trajektorie tělesa proti směru otáčení celé soustavy [13]
kašna	- prostor, ve kterém je usazena turbína (platí jen pro určité typy turbín)
kavitace	- vznik a zánik dutin plynu v proudící kapalině při místním poklesu tlaku, způsobuje poškození částí vodních strojů, např. oběžných kol turbín
vývar	- prostor pod vodní elektrárnou, kam odchází voda z turbíny, nebo prostor pod přehradou, kam vytéká voda z výpustí
ČEA	- Česká energetická agentura
MVE	- malá vodní elektrárna
OZE	- obnovitelný zdroj energie
SFŽP	- Státní fond životního prostředí
ERU	- Energetický regulační úřad

1 Úvod

V této bakalářské práci budu navrhovat vhodné řešení strojní části malé vodní elektrárny pro zadané parametry toku. Průtok je dán tabulkou, na jejímž základě sestavím odtokovou křivku – bude vysvětleno později. Dále znám hrubý spád lokality a při návrhu řešení musím také zohlednit nutný asanační průtok. Obecně by se práce dala rozdělit na dva větší celky. V první části se budu věnovat využívání vodní energie při výrobě energie elektrické a to především v podmínkách malých vodních elektráren. V druhé části pak blíže popíši a zdůvodním řešení, které jsem pro zadané podmínky zvolil. Součástí bude také výpočet vyrobeného množství elektrické energie a stanovení doby návratnosti investic.

Zadané parametry toku:

- hrubý spád: $H_b = 3,9 \text{ m}$
- asanační průtok: $Q_{asan.} = 1,89 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Tab. 1.1 – Zadané hodnoty křivky

Počet dní	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Průtok [m ³ ·s ⁻¹]	22,6	17,5	13,8	10,3	9,89	7,2	6,8	5,1	4,7	4,1	4	3,9	3,8

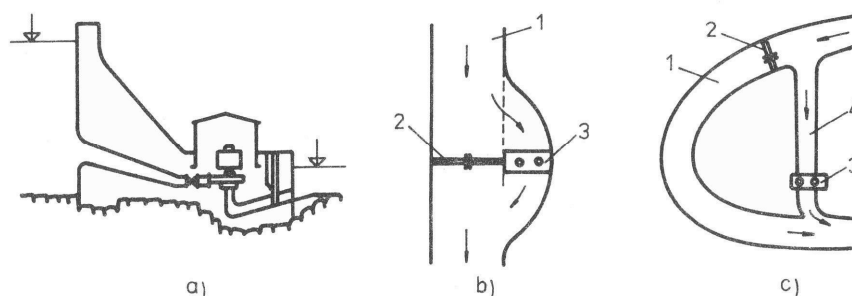
2 Využívání vodní energie

Využívání energie vody představuje v historii lidstva, společně s využitím energie větru, nejstarší způsoby mechanického pohonu nejrůznějších zařízení. Jako příklad uvedu instalaci prvních mlýnů na rychle tekoucích horských potocích a řekách. Zde byla použita vodní kola poháněna přímým bočním vtokem proudu vody na lopatky oběžného kola. Tato první zařízení však poskytovala při zatížení, které představoval pohon mlýnských kamenů, poměrně nízký výkon a nízké otáčky. Postupem času ovšem vývoj v oblasti hydromechaniky a použití převodů umožnily značné zvýšení účinnosti a možnost stavby těchto zařízení i na spodních částech toků. Šlo především o vynález horizontálního vodního kola se spodním nátokem. Dalším vývojem se lidstvo dostalo až

ke kolům korečkovým s horním nátokem. Tato moderní kola už dosahují účinnosti přeměny energie v rozsahu $\eta = 0,6$ až $0,8$. Vodní kola však byla z velké části nahrazena vodními turbínami, poskytujícími ještě vyšší účinnosti a lepší možnosti uplatnění. Vývoj vodních turbín v 19. a 20. století umožnil jejich využití při stále se zvyšující výrobě elektrické energie.

2.1 Rozdělení vodních elektráren

Energie vodního toku, kterou jsme schopni prostřednictvím vodních turbín využít k pohonu strojů (mlýny, pily) nebo výrobě elektrické energie, odpovídá součinu spádu a průtoku. Energetická a následně i ekonomická využitelnost vodní energie je závislá především na její soustředěnosti, tj. na místní koncentraci měrné energie nebo průtoku, popřípadě obou těchto veličin. Charakter této koncentrace může být přirozený nebo umělý. Jelikož je míst s přirozeně koncentrovanou měrnou energií při dostatečném průtoku v přírodě málo, obvykle využíváme prostředky umělé koncentrace. Podle technického řešení soustředění vodní energie a způsobu přívodu vody k turbíně můžeme rozlišit hydroenergetická díla přehradní, derivační, přehradně derivační a přečerpávací.



Obr. 2.1.1 – Základní varianty řešení hydroenergetických děl [2]

a) přehradní, b) jezová, c) derivační,

1 - koryto řeky, 2 - vzdouvací zařízení, 3 - elektrárna, 4 - derivační přivaděč

Přehradní díla využívají k vytvoření zvýšené hladiny v horní nádrži vzdouvacího zařízení. Může jím být přehradní hráz nebo jez. Na středních úsecích toku se často využívá přehradní hráze, potom je možno elektrárnu umístit např. v tělese hráze, pod vzdušnou patou hráze nebo pod přelivy. Na dolním toku využíváme jako vzdouvacího

zařízení jezu (není to však pravidlem). Při realizaci jezu se nabízí řada variant uspořádání elektrárny např. v zářezu břehu, natočenou po vodě nebo proti vodě, aj. Dále je možno umístit elektrárnu v tělese jezu pod přelivy nebo v pilířích jezu. Na horních a také středních tocích se nabízí použití derivačních hydroenergetických děl, jež využívají přirozených průtoků bez větší možnosti akumulace. Vzdouvací zařízení zde umožňuje svedení vody do derivačního přivaděče (např. potrubí, kanálu), kde probíhá soustředění měrné energie. Přehradně derivační díla využívají přehradu jednak k akumulaci průtoků, jednak ke zvýšení měrné energie. Elektrárny na těchto dílech pracují převážně jako špičkové. Sekundárními zdroji vodní energie jsou hydroenergetická díla přečerpávací, která umožňují hydraulickou akumulaci elektrické energie. Podle celkové koncepce energetického využití toku dále rozlišujeme říční řešení – voda, která je přiváděna k turbíně neopouští říční koryto a derivační řešení – voda sloužící k pohonu turbín je odváděna z koryta přivaděčem a po odevzdání své energie v elektrárně je opět přivedena zpět do koryta odpadním kanálem.

Dle ČSN 38 0105 lze vodní elektrárny rozdělit podle velikosti využívané polohové měrné energie na nízkotlaké $E < 200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, středotlaké $E < 1\,000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ a vysokotlaké $E > 1\,000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Dalším hlediskem při rozlišení vodních elektráren je způsob provozu. Podle něj se dělí na průtočné (bez akumulačního prostoru) a špičkové (s akumulační nádrží) kam řadíme i elektrárny přečerpávací.

Nejvíce používaným je rozdělení vodních elektráren podle velikosti instalovaného výkonu na velké $P > 100 \text{ MW}$, střední $P < 100 \text{ MW}$ a malé $P < 10 \text{ MW}$.

2.2 Malé vodní elektrárny

Pojmem malá vodní elektrárna (MVE) označujeme hydroenergetická díla s instalovaným výkonem $P < 10 \text{ MW}$. Tato zařízení lze z výkonového hlediska rozdělit na tři kategorie. Každá z nich je charakteristická počtem realizací elektráren daného výkonu, vazbou na veřejnou elektrizační soustavu a také ekonomickou náročností realizace. První je kategorie výkonů $P = 5$ až 10 MW . Tato zařízení se instalují na větších tocích, napojují se do veřejné sítě vysokého napětí a jejich výstavba je spojena s většími investičními náklady. Kategorie výkonů $P = 100$ až $5\,000 \text{ kW}$ je významná

počtem lokalit a zařízení se napojují zpravidla do sítě vysokého napětí. Výstavba je zatížena relativně nízkými investičními náklady. Kategorie výkonů P menších než 100 kW je co do počtu lokalit nejčastější. Stroje se napojují do sítí vysokého i nízkého napětí a výstavba je opět zatížena relativně nízkými investicemi. MVE jsou charakteristické malou poruchovostí, nízkými provozními náklady a vysokým počtem hodin, který jsou ročně v provozu. U dnešních elektráren se hojně využívá automatického provozu bez nutnosti obsluhy. Jedním z největších pozitiv pro investory, uvažujících o výstavbě MVE, jsou především relativně nízké měrné výrobní náklady na 1 kWh. Vstupní investiční náklady mohou ovšem představovat značnou finanční zátěž. Při uvažované výstavbě MVE s nízkou hodnotou instalovaného výkonu mohou být investiční náklady relativně vyšší. Závisí především na projekčním řešení, charakteru provozu elektrárny a na použitém technologickém zařízení, na něž připadá 30 až 85 % nákladů. Cena turbíny představuje, podle údajů některých výrobců, jen 10 až 30 % celkových investičních nákladů na realizaci MVE.

Z energetického hlediska je významná úloha MVE jako zdroje jalové energie, která snižuje ztráty v rozvodné soustavě. Důležité jsou také faktory ekologické, jež činí z MVE zdroj elektrické energie, který teoreticky nejméně zatěžuje přírodu a životní prostředí. Odpadají jakékoli emise a při vhodně zvoleném technickém řešení nepředstavuje ekologickou zátěž ani výstavba malých provozních nádrží, které jsou nutné pro realizaci některých druhů MVE. Tyto stavby nemají znatelný vliv na klima, geologické podloží, ani na stav hladin podzemních vod, jak tomu bývá u velkých vodních nádrží.

2.3 Vodohospodářské řešení malé vodní elektrárny

Hydroenergetická díla lze podle systému hospodaření s vodou obecně rozdělit na průtočná a regulační. Průtočná díla využívají lidskými zásahy neovlivněný průtok toku a jsme jimi schopni využít maximálně průtoky o velikosti hlnosti instalovaných turbín. Větší průtoky zůstávají nevyužity a odcházejí přes vzdouvací zařízení. Díla regulační jsou vybavena přirozenými nebo umělými nádržemi k akumulaci objemu vody a umožňují regulovaný odběr dle aktuální potřeby energie. Tato zařízení pracují převážně jako špičková a nejčastěji využívají denní nebo týdenní akumulaci. V tomto ohledu je rozhodující lokalita, která byla vybrána pro realizaci elektrárny. Každé místo toku je charakteristické svými průtokovými parametry a také reliéfem krajiny (ne všude

je možno postavit akumulční nádrž a je nutno hledat jiné řešení). Průtok a objem případné akumulční nádrže dále určují velikost instalovaného výkonu elektrárny.

Na vodohospodářských zařízeních se často instalují MVE k využití asanačních průtoků nebo průtoků nutných pro vodohospodářské účely. Často pracují jako elektrárny průtočné. Pokud tomu tak není, je nutno vyřešit problémy, které vznikají při jejich provozování na rybnících, které jsou významné svým původním určením a tím je chov ryb. Na základě výzkumu bylo zjištěno, že fauně a flóře rybníků škodí především dlouhodobé výkyvy ve výšce hladin, naopak nevaří krátkodobé změny v rozmezí 10 cm. U rybníků s instalovanou MVE dochází ke krátkodobému poklesu hladin v období špičkových odběrů ze sítě, kdy je elektrárna v provozu. Po zbytek dne dochází k opětovné akumulaci vody. Vždy ale záleží na konkrétních podmínkách - velikosti rybníku, vydatnosti a stálosti přítoku, jímž je rybník napájen atd. Těmito parametry je pak určen instalovaný výkon MVE. Ekonomický záměr jednoho subjektu, v tomto případě majitele vodní elektrárny, nesmí zasahovat do ekonomické činnosti chovatelů ryb ani porušovat zákony na ochranu přírody. Je nutné najít vhodné řešení pro každou uvažovanou lokalitu.

Při realizaci MVE na splavných úsecích toků je z hlediska provozu žádoucí plynulá regulace při najíždění a odstavování turbín, aby nedocházelo k nežádoucímu vzniku vln a náhlým změnám výšky hladiny především pod vodním dílem.

2.4 Projektové řešení malé vodní elektrárny

MVE se řeší jako elektrárny jezové, nebo elektrárny derivační s tlakovým přiváděčem nebo přiváděčem s volnou hladinou. Pro menší průtoky a měrné energie vyšší než $E = 80$ až $100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ je vhodné použít tlakový přiváděč. Pro průtoky $Q = 0,3$ až $8,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ při střední hodnotě rychlosti proudění $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ můžeme použít přiváděč beztlakový. Tyto údaje jsou ovšem spíše informativního charakteru. Skutečná řešení jsou závislá na použitém typu turbíny a parametrech toku a nelze je takto jednoznačně určit.

Základními prvky MVE jsou obecně akumulční zařízení a jím vytvořená nádrž, vtokový objekt s česlemi, přiváděč, strojovna, odpadní kanál nebo potrubí a další provozní zařízení, jakými jsou například hydraulika k ovládání lopatek rozváděče,

popřípadě oběžného kola, zařízení pro čištění česlí a samozřejmě elektroinstalace včetně řídicí elektroniky.

Vtokový objekt je důležitým prvkem stavební části vodní elektrárny a jeho projektové řešení může značně ovlivnit celkovou účinnost zařízení a to buď v pozitivním, nebo také negativním smyslu. Vtokové objekty členíme na tlakové, beztlakové a speciální. Vtokové objekty tlakové se používají pro vstup vody do tlakových přivaděčů nebo přímo na turbíny. Beztlakové vtokové objekty odebírají vodu do beztlakových přivaděčů s volnou hladinou – náhonů. Mezi speciální vtokové objekty můžeme například zařadit sací koše nebo síta používaná především u mikrodrogů ($P < 100$ kW). Nezbytnou součástí vtokových objektů jsou česle se svými podpěrnými prvky. Jejich úkolem je zamezení tomu, aby společně s vodou vnikaly do přivaděče vody k turbíně mechanické nečistoty, které by mohly ovlivnit proudění vody nebo poškodit některé části rozváděče a oběžného kola. U MVE je většinou nutno použít kromě česlí jemných i hrubé česle, sloužící k ochraně před většími předměty unášenými vodou, jakými mohou být větve a kmeny stromů nebo ledové kry. Konstrukce česlí musí být taková, aby příliš neovlivňovala proudění vody a zbytečně nezvyšovala hydraulické ztráty. Česle také musejí odolávat provoznímu zatížení, proto se konstrukce vtoku s hrubými česlemi dimenzuje na plné ucpání s respektováním přídatku na bezpečnost.

Přivaděče a odpady bývají vyrobeny z oceli, litiny, železobetonu, plastu nebo dřeva. Od použití dřeva se v současné době vzhledem k jeho životnosti a ceně téměř upustilo. Pro přívod nebo odvod vody k turbínám mohou být také využity štoly a šachty vylámané ve skále.

Důležitou součástí realizací reakčních turbín (bude vysvětleno později) je savka. Savka je zařízení, které vodotěsně spojuje výstupní odtokovou část turbíny za oběžným kolem se spodní vodou. Savka umožňuje využít energii vody, která už opustila lopatky oběžného kola a nebyla by již dále využitelná. Savka je z konstrukčního hlediska rozšiřující se potrubí, ve kterém proudící voda zaujímá stále větší objem a tím se snižuje její rychlost. Při snižování rychlosti dochází k přeměně kinetické energie vody na energii podtlaku, která působí na oběžné kolo. Použití savky umožnilo značné zvýšení účinnosti nejvíce používaných vodních turbín. Stavební řešení MVE se mohlo díky téměř libovolné výšce umístění turbíny mezi horní a spodní hladinou snáze přizpůsobit požadované lokalitě. Maximální výška umístění turbíny nad spodní hladinou je závislá

na fyzikálních zákonech popisujících celistvost vodního sloupce a také na riziku vzniku kavitace. Návrhu savky se věnuje velká pozornost, jelikož hodnota energie vody, kterou jsme díky ní schopni využít, je poměrně značná. Tato energie tvoří 30 – 50 % celkové energie vody [3], kterou jsme schopni turbínou využít.

Ze stavebního hlediska rozlišujeme u vodních elektráren takzvanou spodní stavbu, v níž je uchycena turbína a která sahá od základů až po podlahu strojovny. Dále může být realizována vrchní stavba, budovaná nad podlahou strojovny. Vrchní stavba slouží u většiny elektráren s vertikálními soustrojími jako prostor, v němž jsou umístěny generátory, prvky regulace, elektrické rozváděče a další zařízení nutná pro provoz MVE. Větší strojovny bývají vybaveny portálovým jeřábem pro manipulaci se strojními částmi při jejich instalaci a také při případných opravách.

V závislosti na způsobu provozu, ve kterém elektrárna pracuje a který má dopad na technické řešení, rozlišujeme:

- MVE pracující paralelně s energetickou veřejnou sítí,
- MVE pracující paralelně s energetickou veřejnou sítí, které umožňují samostatný provoz elektrárny do vyčleněné sítě,
- MVE pracující samostatně do vyčleněné sítě.

Paralelní práce s energetickou sítí dovoluje provoz bez použití napěťové a otáčkové regulace. Napětí i frekvence jsou dány a drženy sítí. Pro samostatný chod je ale otáčková a napěťová regulace nezbytná. Z důvodu zachování optimálních otáček bývá do soustrojí často zařazen setrvačnick. To se týká především menších soustrojí u kterých je po připojení generátoru do sítě možnost autoregulace otáček z důvodu nedostatečného momentu setrvačnosti značně omezená. U MVE bývá často nutné použít převodovku a to z důvodu jiných provozních otáček turbíny a generátoru. Převod bývá realizován ozubením, řemeny (plochými, klínovými, ozubenými) a také řetězy. U velkých soustrojí se používají synchronní mnohapolové generátory, které umožňují přímé spojení turbíny a generátoru, ale které vzhledem ke své vyšší ceně nejsou v mnoha realizacích MVE dostupné. Uspořádání strojů ve výrobním objektu MVE je různé a odvíjí se především od použitého typu turbíny. Dále také záleží na tom, zda se elektrárna staví jako nová i s její stavební částí, nebo se realizuje ve starším objektu, například bývalém mlýnu. Pak se řešení přizpůsobuje daným podmínkám.

3 Vodní turbíny

Velkou skupinu energetických zařízení, sloužících k přeměně energie vody (kinetické, potenciální, tlakové) na energii mechanickou nazýváme vodní stroje. Do této skupiny patří kromě vodních turbín také vodní kola na horní vodu, spodní vodu nebo kola se středním nátokem.

Vodní kola nacházejí uplatnění převážně v podmínkách nízkých spádů 0,5 až 1,5 m, na kterých většinou není možno použít vodní turbínu. Vodní kola jsou schopna dosáhnout účinnosti $\eta = 60$ až 80 %, která je srovnatelná s účinností vodních turbín srovnatelných parametrů a rozlišujeme je dle charakteru využívané složky energie vody. První skupinou jsou vodní kola lopatková, jenž využívají kinetickou energii vodního proudu a druhou skupinou jsou vodní kola korečková, využívající potenciální energii vody. Vodní turbíny jsou zařízeními, jejichž vývoj byl zapříčiněn stále většími nároky na výkon, otáčky, účinnost a použitelnost v různých tvarech reliéfu, které už vodní kola nedokázala uspokojit. Další zdokonalování vodních turbín se zaměřilo také na využití tlakové energie vody, která tvoří u reakčních strojů podstatnou část využívané energie.

3.1 Rozdělení vodních turbín, turbínová rovnice [2, 6]

Podle té části mechanické energie vody (kinetická nebo tlaková), která při přeměně vody v turbíně převažuje, rozlišujeme:

- reakční turbíny, které využívají kinetickou i tlakovou složku mechanické energie vody, např. Francisovy turbíny,
- akční turbíny, využívající převážně nebo výhradně kinetickou složku mechanické energie vody např. Peltonovy turbíny.

U některých turbín ale nelze striktně rozlišit, do které z těchto skupin patří, jelikož charakter jejich práce je takový, že více či méně zasahuje do obou kategorií. Dále se rozlišují turbíny podle způsobu přenosu energie vody na:

- přetlakové turbíny, u nichž je část tlakové měrné energie přeměněna v zařízení sloužícímu pro přívod vody k oběžnému kolu na energii kinetickou. Zbývající

část tlakové energie se mění na kinetickou při průchodu vody oběžným kolem, např. Kaplanovy a Francisovy turbíny,

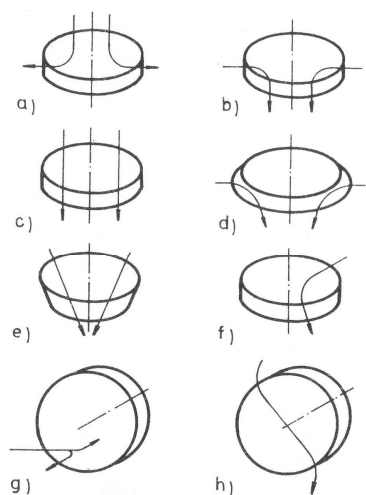
- rovnotlaké turbíny, u nichž se celá hodnota měrné tlakové energie mění v zařízení pro přívod vody k oběžnému kolu na energii kinetickou. Stejný tlak je potom na vstupu i na výstupu z oběžného kola např. Peltonovy, Bánkiho turbíny a také turbíny Turgo.

Podobně jako vodní elektrárny lze i vodní turbíny rozdělit podle velikosti využívané měrné energie na:

- nízkotlaké turbíny $E < 200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ – Kaplanovy turbíny,
- středotlaké turbíny $E < 1\,000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ – Kaplanovy, Dériazovy a Francisovy turbíny,
- vysokotlaké turbíny $E > 1\,000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ – Francisovy a Peltonovy turbíny.

Podle orientace proudění vzhledem k ose otáčení oběžného kola se turbíny dělí na:

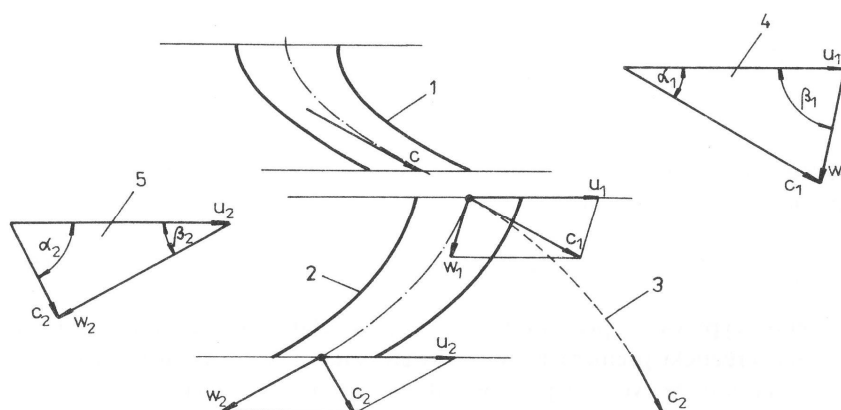
- centrifugální turbíny – voda protéká oběžným kolem směrem od osy rotace, např. Fourneyronova turbína,
- centripetální turbíny – voda protéká oběžným kolem směrem k ose rotace, např. historický typ Francisovy turbíny,
- axiální turbíny – voda protéká oběžným kolem ve stálé vzdálenosti od osy rotace, např. Kaplanova turbína,
- radiálně axiální turbíny – voda proudí přes oběžné kolo nejdříve radiálně a potom přibližně ve směru osy rotace, např. moderní Francisova turbína,
- diagonální turbíny – průtok vody oběžným kolem je šikmý směrem k ose rotace, např. Dériazova turbína,
- turbíny se šikmým průtokem – voda vstupuje do oběžného kola z boční strany a vystupuje z něj ve směru osy rotace, např. turbína Turgo,
- tangenciální turbíny – voda vtéká na oběžné kolo v tangenciálním směru, např. Peltonova turbína,
- turbíny s dvojnásobným průtokem – voda vstupuje do oběžného kola centripetálně a vystupuje centrifugálně, např. Bánkiho turbína.



Obr. 3.1.1 – Rozdělení turbín podle průtoku oběžným kolem [2]

- a) turbína centrifugální
- b) turbína centripetální
- c) turbína axiální
- d) turbína radiálně axiální
- e) turbína diagonální
- f) turbína se šikmým průtokem
- g) turbína tangenciální
- h) turbína s dvojnásobným průtokem

Proudění vody na lopatkách přetlakových turbín popíše podrobněji. Základním vztahem, popisujícím hydraulické řešení vodních turbín, je Eulerova energetická rovnice, která platí obecně pro jakýkoliv libovolně umístěný rotující kanál. V následujícím textu provedu zjednodušené odvození této rovnice na základě podkladů získaných z literatury. Oběžné kolo reakční turbíny si lze představit jako soustavu rotujících kanálů proměnného průřezu, které jsou tvořeny prostory mezi jednotlivými lopatkami. U rotujícího kanálu je navíc oproti kanálu pevnému nutno uvážit vliv úhlové rychlosti ω , a také vliv Coriolisovy síly, která vytváří moment k ose otáčení. Pro pochopení dalšího textu je uveden obr. 3.1.2, na kterém jsou znázorněny úhly a průběhy rychlostí částic vody při průchodu rozváděcím a oběžným kolem přetlakové reakční turbíny.



Obr. 3.1.2 – Schéma lopatkování pro využití reakčního působení toku vody [2]

- 1 – lopatka rozváděče, 2 – lopatka oběžného kola, 3 – relativní dráha, 4 – vstupní rychlostní trojúhelník, 5 – výstupní rychlostní trojúhelník

Voda opouští kanál rozváděcího kola rychlostí c a do oběžného kola vstupuje rychlostí c_1 . Rychlost u_1 je obvodová rychlost vstupní části oběžného kola. Vektor absolutní rychlosti c_1 je od vektoru rychlosti u_1 odkloněn o úhel α_1 . Rychlost w_1 je relativní rychlost vody na vstupu do oběžného kola a získá se vektorovým součtem rychlosti c_1 a záporné rychlosti u_1 . Rychlost w_1 svírá s rychlostí u_1 úhel β_1 . Voda opouští kanál oběžného kola relativní rychlostí w_2 , jejíž vektor je odkloněn od vektoru oběžné rychlosti výstupní části oběžného kola u_2 o úhel β_2 . Absolutní rychlost c_2 , kterou má voda na výstupu z oběžného kola a která svírá s vektorem obvodové rychlosti u_2 úhel α_2 , se získá vektorovým součtem rychlostí w_2 a u_2 . Voda působí na rotující kanál výsledným momentem M , který zahrnuje jak působení úhlové rychlosti ω , tak i působení Coriolisovy síly. Tento moment můžeme vyjádřit vztahem:

$$M = \rho \cdot Q \cdot [R_1 \cdot (u_1 - w_1 \cdot \cos \beta_1) - R_2 \cdot (u_2 - w_2 \cdot \cos \beta_2)] \quad (3.1.1)$$

R_1 je vzdálenost vstupní části kanálu (oběžného kola) od osy rotace, R_2 je vzdálenost výstupní části kanálu od osy rotace. Dalšími veličinami je hustota kapaliny ρ a průtok Q . Z rychlostních trojúhelníků můžeme vyjádřit obvodové složky absolutních rychlostí:

$$c_{u1} = c_1 \cdot \cos \alpha_1 \quad c_{u2} = c_2 \cdot \cos \alpha_2 \quad (3.1.2)$$

Výsledný moment působící na rotující kanál můžu kromě uvedeného vztahu (1) vyjádřit i pomocí výkonu P a hydraulické účinnosti η_h :

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{\rho \cdot Q \cdot E \cdot \eta_h}{\omega} \quad (3.1.3)$$

Účinnost η_h je účinností hydraulickou a zahrnuje ztráty vzniklé při proudění reálné (vazké) kapaliny. Po úpravě dostanu z rovnosti výrazů (3.1.1) a (3.1.3) a s použitím vztahu (3.1.2) Eulerovu energetickou rovnici, jinak též nazývanou rovnicí turbínovou:

$$E \cdot \eta_h = u_1 \cdot c_{u1} - u_2 \cdot c_{u2} \quad (3.1.4)$$

Úpravou rovnice turbínové můžeme získat rovnici průtokovou:

$$E \cdot \eta_h = 0,5 \cdot [(c_1^2 - c_2^2) + (w_2^2 - w_1^2) + (u_1^2 - u_2^2)] \quad (3.1.5)$$

3.2 Základní popis vybraných typů vodních turbín

3.2.1 Francisova turbína a její použití v MVE [4, 11]

Vertikální Francisova turbína je turbínou přetlakovou s radiálně axiálním prouděním vody a plným vtokem do oběžného kola. Regulace výkonu se provádí natáčením lopatek rozváděče, tedy změnou průtoku, který přichází na pevné lopatky oběžného kola. Francisova turbína se používá pro větší spády až do 700 m. Její výhodou je poměrně jednoduchá konstrukce, nevýhodou je citlivost na změny průtoku a na kolísání spádu.

Vertikální kašnová Francisova turbína byla v minulosti velmi rozšířeným vodním strojem. Používala se v nížinách na větších tocích, kde se instalovala na vodních dílech jezových nebo derivačních s otevřeným přivaděčem. Sloužila např. k pohonu městských elektráren nebo mlýnů. Při použití násoskové kašny využívala již spád od 0,5 m, většinou však pracovala se spádem v rozmezí od 1,5 do 5 m a průtoky cca od 0,6 do 8 m³·s⁻¹. Vertikální turbína má poněkud vyšší účinnost ve srovnání s turbínou horizontální a to díky přímé savce, která má oproti savce kolenové, která je použita u horizontální turbíny, příznivější proudění sloupce vody s menšími ztrátami. Tato zařízení jsou konstruována převážně jako rychloběžná, kdy otáčky dosahují hodnot až $n_s = 400$ ot./min./m/HP. Starší typy těchto zařízení mají oběžné kolo tzv. normáloběžné s otáčkami pohybujícími se v rozmezí $n_s = 150$ až 250 ot./min./m/hp.

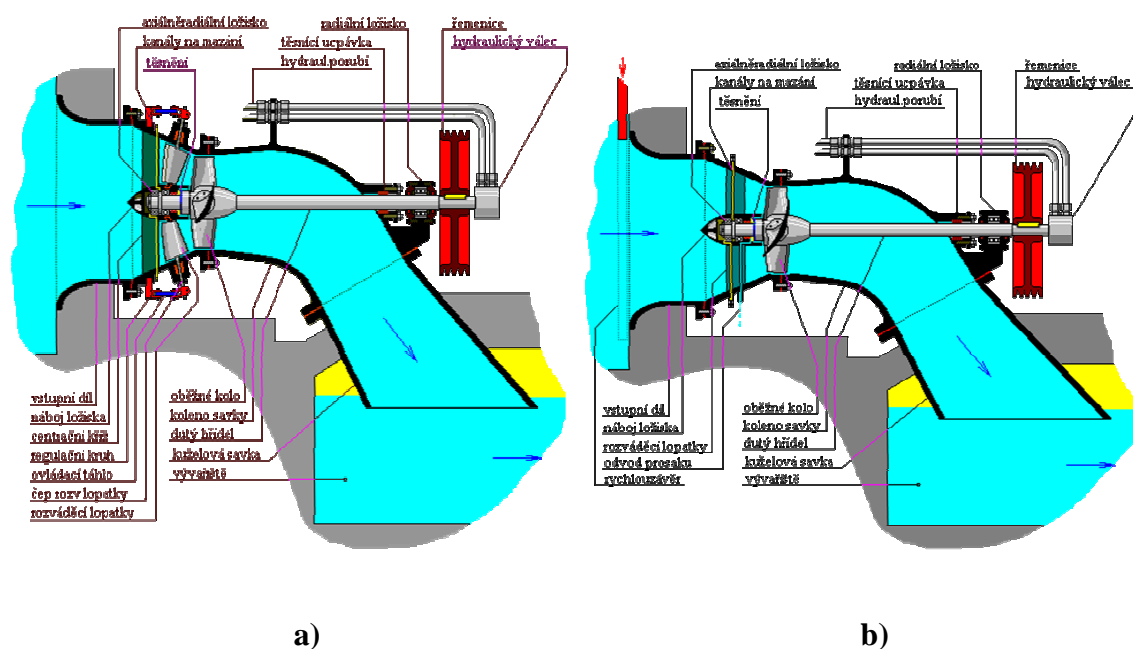
Horizontální Francisovy turbíny sloužily k podobným účelům, jako turbíny vertikální. Poháněly mlýny, pily a další podobná zařízení. V současné době se některé z těchto starších zařízení, ve kterých se turbíny zachovaly, přestavují na MVE. Vertikální turbíny většinou pracují se spádem v rozmezí od 2 do 8 metrů při průtocích cca od 0,1 do 2 m³·s⁻¹. Jak už bylo zmíněno, má tato turbína, kvůli použití kolenové savky, menší účinnost, než turbína vertikální. Má však jiné výhody. Jednou z nich je přímý horizontální hřídel, který vychází do prostoru strojovny a který umožňuje použití jednodušších převodů (např. řemenových), díky nimž se u některých realizací celková účinnost zařízení přibližuje turbínám horizontálním s ozubeným převodem. Tyto turbíny jsou většinou normáloběžné, rychloběžnější se používají na malých spádech. Horizontální turbíny mohou mít buď tzv. suchou savku, která je umístěna v prostoru strojovny nebo tzv. mokrou savku, realizovanou v prostoru kašny. Toto řešení je použito i u turbíny zobrazené na obr. 3.2.1.1 b).

schopny využít spády přibližně v rozmezí od 3 do 70 m a jsou vhodné pro velké průtoky.

V podmínkách MVE elektráren se často používají řešení s horizontální nebo vertikální kašnovou Kaplanovou turbínou. Turbína horizontální je vhodná pro hodnoty měrné energie $E = 15$ až $50 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ a pro průtoky $0,5$ až $6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Vertikální turbína se používá pro vyšší měrné energie $E = 50$ až $100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. Kaplanova turbína se spirální skříní, která se používá pro vyšší měrné energie, není pro podmínky MVE příliš vhodná.

Kaplanova S-turbína, jejíž název je odvozen od tvaru savky, je jedním z nejčastěji instalovaných typů turbín na nově budovaných MVE s malým spádem. Používá se na dílech jezových či derivačních s otevřeným přivaděčem. Převážně slouží k pohonu asynchronních generátorů. Použití generátorů synchronních ovšem není díky dvojité regulaci, prováděné regulovatelným rozváděčem i lopatkami oběžného kola, vyloučeno. Kaplanova S-turbína dovoluje v závislosti na své konstrukci využití spádů cca od 1,5 do 5,5 metrů a průtoků pohybujících se přibližně v rozmezí od 0,25 do $6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Přenos síly do generátoru bývá realizován řemenovým převodem. U větších soustrojí se používá převod ozubený. Výhodami tohoto typu stroje jsou poměrně nízké náklady na stavební část elektrárny, kdy odpadá nutnost použití kašny či hlubokého vývaru. Dalšími výhodami jsou možnost instalace v pilířích jezu a také nízká stavební výška. Nevýhodou je složitost mechanismu regulace, která zvyšuje cenu celého stroje. Náklady na pořízení turbíny jsou, zvláště u výstavby MVE, velmi důležitou položkou. Vyšší cenu těchto zařízení kompenzuje jejich výborná regulovatelnost, díky níž se tyto turbíny mohou instalovat i na toky s proměnnými hydrologickými parametry.

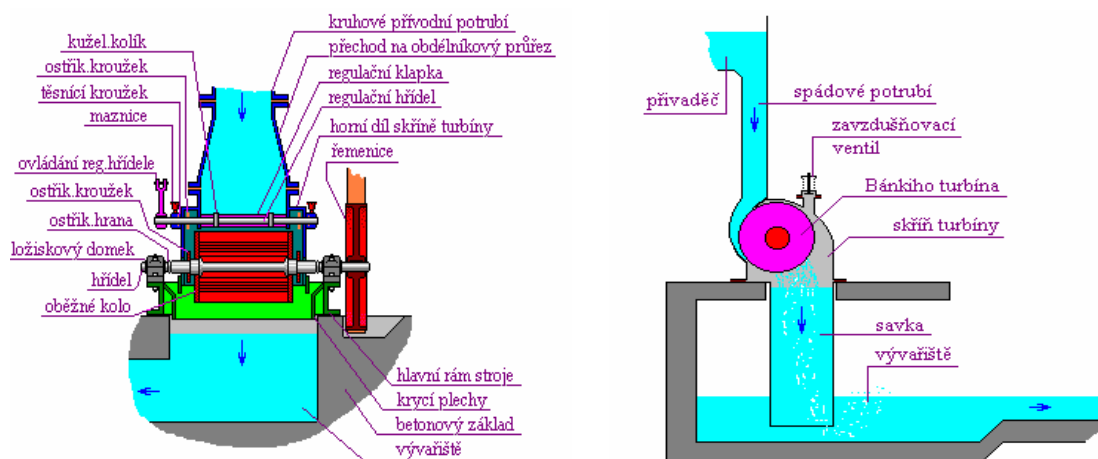
Turbína typu Semi-Kaplan, označována také jako turbína Thomannova, se vyznačuje stejnými hodnotami využitelných spádů a průtoků, jako Kaplanova S-turbína. Není ovšem vybavena regulovatelným rozváděčem, což značně snižuje možnosti regulace. Nastavitelné lopatky oběžného kola a pevný rozváděč však stále poskytují širší regulaci, než kombinace regulovatelného rozváděče a oběžného kola s pevnými lopatkami. Tato turbína najde uplatnění na tocích, u kterých se příliš nemění hodnoty průtoků.



Obr. 3.2.2.1 – a) Přímoproudá Kaplanova S-turbína a b) přímoproudá turbína typu Semi-Kaplan [11]

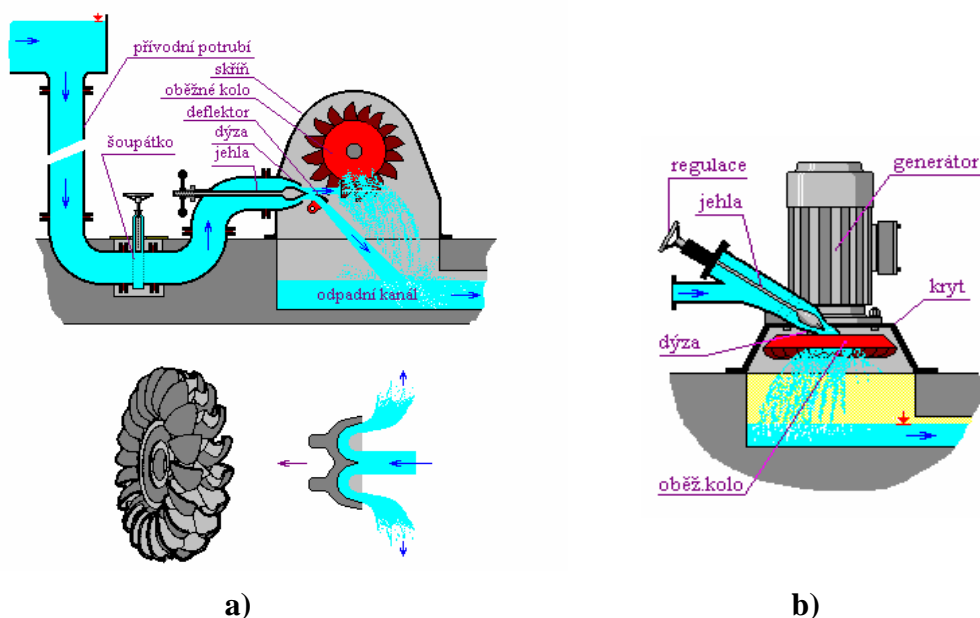
3.2.3 Bánkiho turbína a její použití v MVE [11]

Bánkiho turbína je turbína radiální s dvojnásobným průtokem vody oběžným kolem. Většinou je konstruována na průtoky $Q = 0,02$ až $9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Vyznačuje se širokým výkonovým rozmezím $P = 1$ až $1\,000 \text{ kW}$. Turbína dokáže pracovat již od minimálních průtoků v rozsahu od 30 do 100 % plnění s poměrně plochou účinnostní charakteristikou. Pro podmínky s proměnlivými hodnotami průtoku se používají turbíny, které mají oběžné kolo tvořeno více sekcemi. Turbína je odolná vůči nečistotám, abrazi a není náchylná ke kavitaci. Díky těmto vlastnostem je v MVE velmi využívána. Turbína je regulována klapkou umístěnou ve vtoku před oběžným kolem. Bánkiho turbína využívá dvojitého průtoku vody lopatkami oběžného kola. Při prvním průtoku odevzdá voda kolem 79 % své energie. Voda proudí vnitřním prostorem oběžného kola a pak vstupuje na lopatky na protější straně, kde se využije i zbývající energie. Po průchodu oběžným kolem je voda odváděna odpadním kanálem, nebo může být pod oběžným kolem umístěna savka, zvyšující účinnost. Na skříni turbíny je umístěn zavzdušňovací ventil, sloužící k přívodu vzduchu do prostoru oběžného kola a pokud je použita savka, reguluje se jím také výška hladiny v savce. Z hlediska provozu je totiž nežádoucí přílišné zatopení oběžného kola.



Obr. 3.2.3.1 – Bánkiho turbína [11]

Dalšími typy turbín, které bývají instalovány v MVE, jsou turbína Peltonova nebo turbína typu Turgo. V podmínkách ČR ale není jejich použití rozšířeno, jelikož vyžadují vyšší spády a turbína Peltonova také značně složitou konstrukci oběžného kola. Bližším popisem těchto typů turbín se kvůli zmíněným důvodům již nebudu dále zabývat. Pro základní představu o jejich konstrukci jsou na obr. 3.2.3.2 uvedeny schématické nákresy.



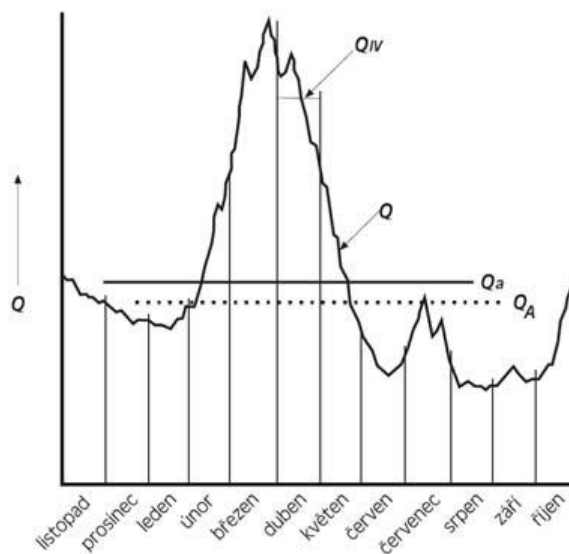
Obr. 3.2.3.2 – a) Peltonova turbína, její oběžné kolo a schéma proudění vody na lopatce
a b) turbína typu Turgo [11]

4 Návrh turbíny pro zadané parametry toku

Základními informacemi, které jsou nezbytné při návrhu vhodné turbíny pro danou lokalitu jsou hrubý spád H_b , což je výškový rozdíl hladin, na kterém bude turbína pracovat a také průtok Q . Průtok je v každém místě vodního toku proměnlivý. Na základě naměřených hodnot průtoků se vytvoří tzv. odtoková křivka. Podle průběhu této křivky určíme optimální, tzv. návrhový průtok, pro který se bude hledat vhodná turbína nebo větší počet turbín.

4.1 Základní popis výpočtu výkonu dle odtokové křivky

Proměnlivost průtoků v dané lokalitě můžeme vynést do grafu. Na následujícím obrázku je znázorněn dosažený průtok v jednotlivých měsících.

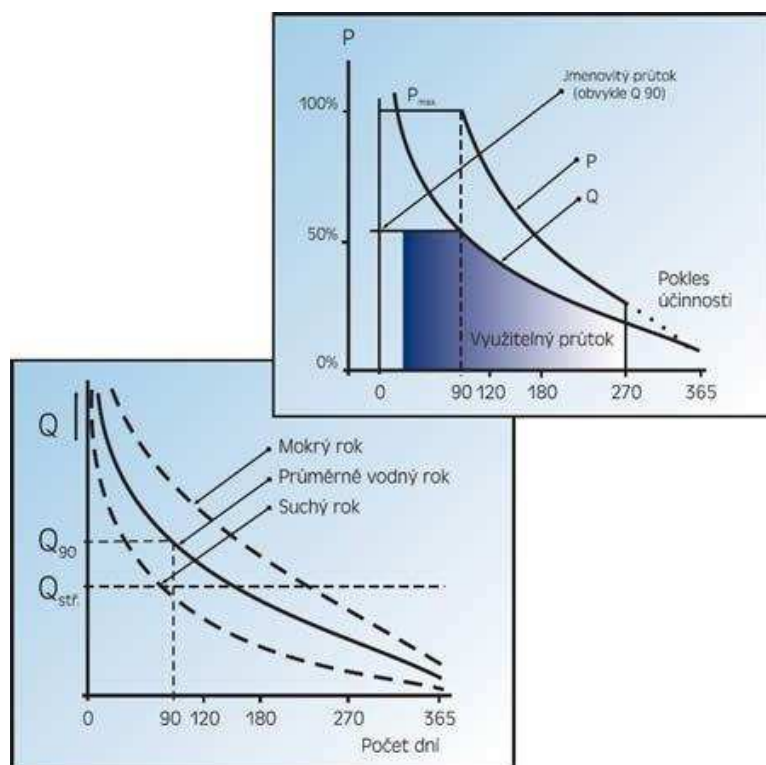


Obr. 4.1.1 – Proměnlivost průtoků toku [12]

Q - průtok, Q_{IV} - průměrný průtok měsíce dubna, Q_a - průměrný roční průtok, Q_A - dlouhodobý průměrný roční průtok

Pro konkrétní místo toku lze proměnlivost průtoků vyjádřit čarou překročení průměrných denních průtoků, tzv. odtokovou křivkou. Odtokovou křivku získám

graficky vynesení jednotlivých hodnot průtoků na svislou osu a na vodorovnou osu vyznačím počty dní v roce, po které je daná hodnota průtoků zaručena.



Obr. 4.1.2 – Roční odtoková závislost a využitelný výkon během roku [12]

Podle této křivky zvolím vhodný návrhový průtok elektrárnou, udávající maximální využitelný průtok, tj. hltlost turbíny. Při použití více turbín je to součet hltlostí všech navrhovaných turbín. Návrhový průtok se u MVE nejčastěji pohybuje v rozmezí 90 – 120 denních průtoků. Odtokovou křivku využijeme také při volbě vhodného typu turbíny s požadovanými možnostmi regulace, která dovolí nejlépe využít poskytované rozmezí průtoků. V grafu to znamená pokrytí co největší plochy pod odtokovou křivkou. Často se proto používá řešení s větším počtem turbín, které dokáže lépe využít poskytovaný průtok. Větší počet turbín se používá na tocích s nevyrovnanými hodnotami průtoků a také u hůře regulovatelných typů strojů, které se vyznačují rychle klesající pracovní charakteristikou. Při potřebě určit přibližně možný výkon zamýšleného zařízení je možno použít vztahu:

$$P_t = k_t \cdot Q \cdot H_b \quad (4.1.1)$$

H_b označuje hrubý spád a k_t je násobný součinitel [5]:

- $k_t = 6,5$ pro nízkotlaké neregulované turbíny (průměr oběžného kola menší než 0,3 m),
- $k_t = 7$ pro nízkotlaké turbíny malých rozměrů (průměr oběžného kola 0,3 až 0,5 m),
- $k_t = 8$ pro nízkotlaké turbíny větších rozměrů (průměr oběžného kola větší, než 0,5 m).

Teoretická měrná energie se určí rovnicí:

$$E_{teor.} = H_b \cdot g \quad (4.1.2)$$

Vztah pro teoretický výkon turbíny $P_{teor.}$ bude s využitím rovnice (4.1.1):

$$P_{teor.} = \rho \cdot Q_{využ.} \cdot E_{teor.} \cdot \eta_t \quad (4.1.3)$$

V těchto rovnicích se vyskytnou následující veličiny: H_b značí hrubý spád, g je tíhové (gravitační) zrychlení, ρ představuje hustotu vody, $Q_{využ.}$ označuje objemový průtok vody turbínou a η_t je celková účinnost turbíny, vyjadřující účinnost přeměny energie vody na energii mechanickou, kterou můžeme následně využít v generátoru k výrobě elektrické energie. Při přenosu kroutícího momentu z turbíny do generátoru však musíme brát v úvahu další ztráty, způsobené převody a také účinností, s kterou je schopen generátor tuto energii převést na energii elektrickou. Konečný jmenovitý výkon P_s , který poskytuje elektrárna do elektrizační soustavy, vyjadřuje rovnice:

$$P_s = \rho \cdot Q_{využ.} \cdot g \cdot H_b \cdot \eta_t \cdot \eta_p \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} \quad (4.1.4)$$

η_t je celková účinnost turbíny, η_p vyjadřuje účinnost převodu hnacího momentu z turbíny na hřídel generátoru, η_g je elektrická účinnost generátoru a η_{tr} je elektrická účinnost transformátoru. Přibližné rozmezí hodnot, ve kterých se pohybují uvedené účinnosti převodu jsou pro ozubené převody $\eta_p = 0,94 - 0,97$, pro řetězové převody $\eta_p = 0,92 - 0,98$. Elektrická účinnost generátoru dosahuje hodnot v rozmezí $\eta_g = 0,84 - 0,93$ a elektrická účinnost transformátoru je závislá na jeho provedení a výkonu.

4.2 Vlastní výpočet možného výkonu zařízení

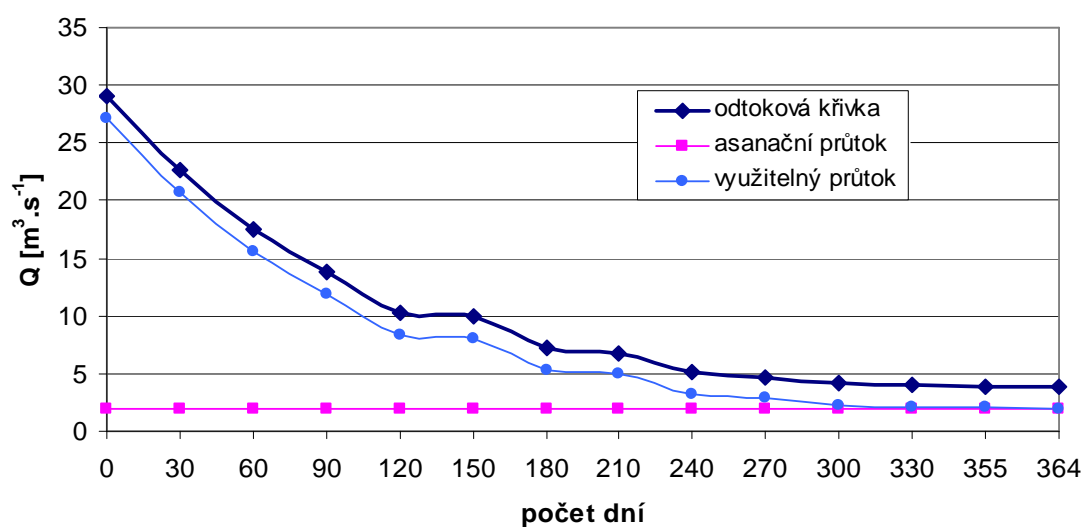
Dle průtoků, které je daný počet dní k dispozici, jsem sestavil odtokovou křivku. Hrubý spád $H_b = 3,9$ m. Dále musím zohlednit asanační průtok $Q_{asan.} = 1,89 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Tab. 4.2.1 – Hodnoty odtokové křivky

Počet dní	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Průtok $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	22,6	17,5	13,8	10,3	9,89	7,2	6,8	5,1	4,7	4,1	4	3,9	3,8

Střední hodnotu průtoku v intervalu 0 – 30 dní odhaduji na základě ostatních hodnot v tabulce na $25,85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Odtoková křivka



Postup výpočtu

Ukázkový výpočet pro interval 30 – 60 dní:

Střední průtok:

$$Q_{stř.} = \frac{Q_{30} + Q_{60}}{2} = \frac{22,6 + 17,5}{2} = 20,05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.2.1)$$

Využitelný průtok:

$$Q_{využ.} = Q_{stř.} - Q_{asan.} = 20,05 - 1,89 = \underline{18,16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}} \quad (4.2.2)$$

Teoretický využitelný výkon (hrubý):

$$P_{teor.,využ.} = Q_{využ.} \cdot H_b \cdot g \cdot \rho = 18,16 \cdot 3,9 \cdot 9,81 \cdot 999,941 \cong \underline{694,742 \text{ kW}} \quad (4.2.3)$$

Časový interval:

$$\tau = \text{dny} \cdot \text{hodiny} = 30 \cdot 24 = \underline{720 \text{ hod.}} \quad (4.2.4)$$

Teoreticky využitelná energie:

$$E_{teor.,využ.} = P_{teor.,využ.} \cdot \tau = 694,742 \cdot 720 = \underline{\underline{500\,214,562 \text{ kWh}}} \quad (4.2.5)$$

Tab. 4.2.2 – Tabulka výpočtů teoretického výkonu a teoretické využitelné energie

Počet dní (interval)	Časový interval τ [hod.]	$Q_{stř.}$ [m ³ /s]	$Q_{asan.}$ [m ³ /s]	$Q_{využ.}$ [m ³ /s]	$P_{teor.}$ [kW]	$P_{teor.,využ.}$ [kW]	$E_{teor.,využ.}$ [kWh]
0 – 30	720	25,85	1,89	23,96	988,937	916,632	659 974,720
30 – 60	720	20,05	1,89	18,16	767,048	694,742	500 214,562
60 – 90	720	15,65	1,89	13,76	598,718	526,413	379 017,201
90 – 120	720	12,05	1,89	10,16	460,994	388,689	279 855,724
120 – 150	720	10,095	1,89	8,205	386,202	313,897	226 005,533
150 – 180	720	8,545	1,89	6,655	326,904	254,599	183 311,008
180 – 210	720	7	1,89	5,11	267,797	195,492	140 754,208
210 – 240	720	5,95	1,89	4,06	227,628	155,322	111 832,110
240 – 270	720	4,9	1,89	3,01	187,458	115,153	82 910,013
270 – 300	720	4,4	1,89	2,51	168,330	96,024	69 137,585
300 – 330	720	4,05	1,89	2,16	154,940	82,635	59 496,886
330 – 355	600	3,95	1,89	2,06	151,114	78,809	47 285,334
355 – 364	216	3,85	1,89	1,96	147,288	74,983	16 196,375
Σ / rok					4 833,357	3 893,389	2 755 991,261

Dle odtokové křivky a hodnot uvedených v tabulce předběžně odhaduji maximální průtok využitelný v elektrárně na $10,16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Skutečná hodnota bude záviset na skutečném maximálním průtoku vybranou turbínou.

4.3 Turbíny vhodné pro podmínky zadání

Pro daný spád a dosti proměnlivý průtok není vhodné řešení s Francisovou turbínou. Použití Bánkiho turbíny je pro relativně velký návrhový průtok také nevhodné. Turbínu typu Semi-Kaplan nebo turbínu vrtulovou, která má regulovatelný rozváděč a pevné lopatky oběžného kola, z důvodu snížené možnosti regulace také nedoporučuji. Nabízí se využití Kaplanovy přímoproudé turbíny nebo Kaplanovy kašnové turbíny. Dané typy vyhoví z hlediska potřebného rozsahu regulace a dokáží dobře využít poskytovaný průtok. Jelikož se mi nepodařilo získat bližší specifikace turbín přímo od výrobců, budu turbínu vybírat ze získaných diagramů použitelnosti. K dispozici mám diagramy Kaplanových turbín výrobců ČKD Turbo Technics, s.r.o., Hydrohrom, spol. s r.o. a také firmy Mavel, a.s. Vybral jsem 2 turbíny, které nejvíce vyhovují zadaným podmínkám. Rozhodující byl rozsah průtoků, který dokáže turbína na daném spádu využít a také hodnota minimálního průtoku, při kterém turbína začíná pracovat. Tyto hodnoty jsou rozhodující při volbě turbíny, která dokáže nejlépe zhodnotit poskytovaný hydrologický potenciál toku.

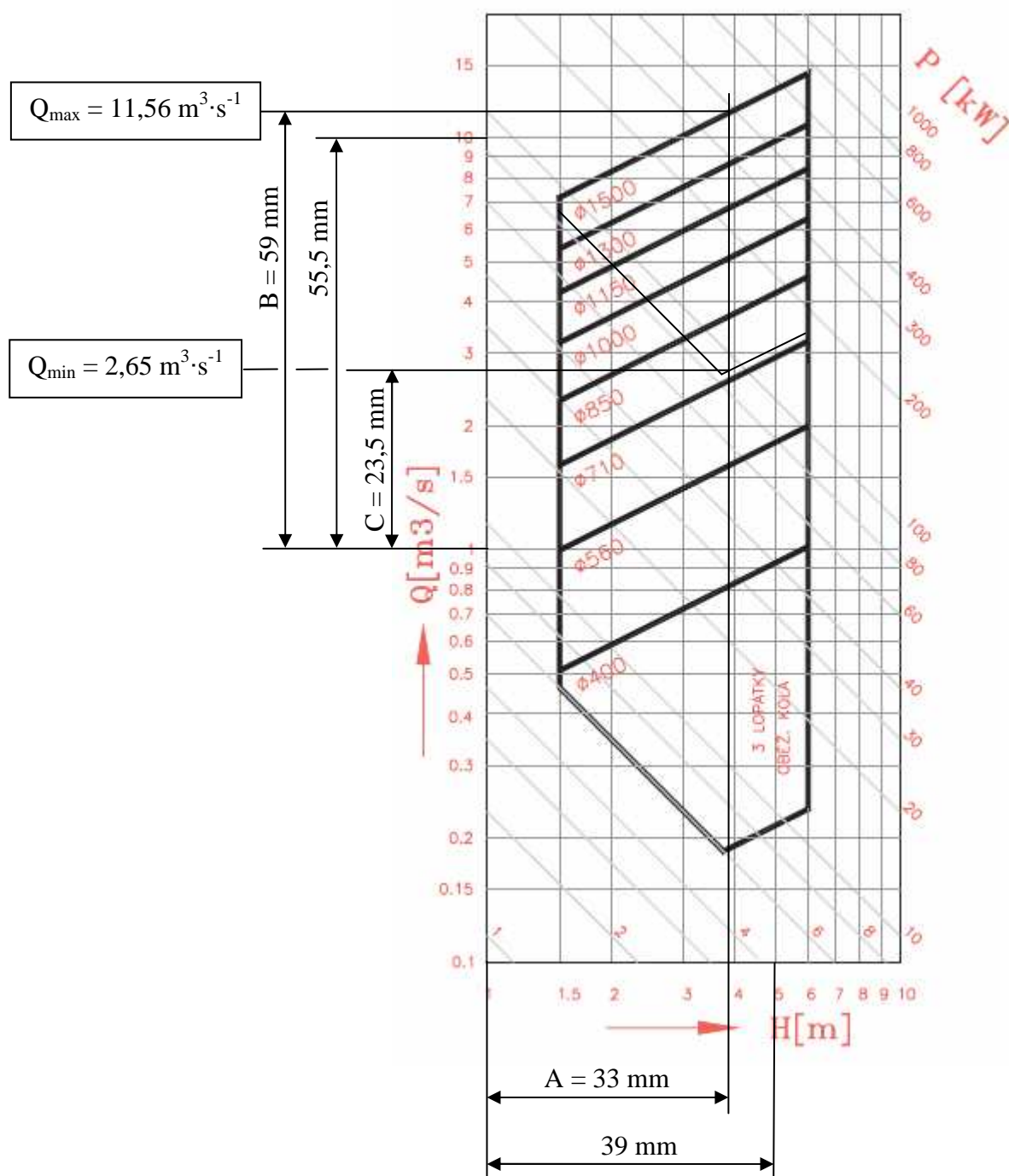
Pro odečtení hodnot maximálního a minimálního průtoku z diagramu použitelnosti dané turbíny musím nejprve určit polohu bodu označujícího spád $H = 3,9 \text{ m}$. Jelikož se jedná o logaritmickou stupnici, určím měřítko a následně požadovanou vzdálenost (polohu) hledaného bodu. Tento postup použiji jak při určování polohy bodu označujícího zadaný spád, tak při odečtu hodnot maximálního a minimálního průtoku. U každé určované veličiny bude uveden výčet hodnot a vzdáleností v diagramu, které k danému výpočtu použiji.

Kaplanova přímoproudá horizontální kolenová turbína (S-Kaplan)

- výrobce ČKD Turbo Technics, s.r.o.
- oběžné kolo: $\Phi 1500 \text{ mm}$, 3 lopatky
- regulovatelné lopatky oběžného kola i rozváděcí lopatky

- lopatky rozváděcího kola z nerezového materiálu uloženy v samomazných pouzdrech
- lopatky oběžného kola odlity z nerezového materiálu odolného proti kavitaci
- hřídel uložena ve valivých ložiscích, je vyvedena přes koleno savky
- ovládání rozváděcího kola hydraulickým servomotorem
- ovládání oběžného kola hydraulicky, případně elektrickým servomotorem

Obr. 4.3.1 – Diagram Kaplanovy přímoproudé horizontální kolenové turbíny



Pozn. Uvedené vzdálenosti [mm] a pozice jednotlivých bodů jsou orientační a slouží k pochopení následujících výpočtů. Jejich číselné hodnoty ovšem odpovídají skutečnosti. Originální diagram, ze kterého byly vzdálenosti odečítány je uveden jako příloha.

1) Spád H_b (hrubý):

- první hodnota použitá k výpočtu měřítka osy spádu: 1 m
- druhá hodnota použitá k výpočtu měřítka osy spádu: 5 m
- vzdálenost hodnot 1 m – 5 m v diagramu: 39 mm
- A – vzdálenost hodnot 1 m – 3,9 m v diagramu: x mm

výpočet měřítka:

$$\log_z 5 - \log_z 1 = 39 \quad (4.3.1)$$

$$\log_z \frac{5}{1} = 39$$

$$\log_z 5 = 39$$

$$z^{39} = 5$$

$$z = \sqrt[39]{5}$$

$$z = \underline{1,04213}$$

výpočet A – vzdálenost hodnot 1 – 3,9 m:

$$A = \log_z \frac{3,9}{1} \quad (4.3.2)$$

$$A = \log_{1,04213} 3,9$$

$$A = \frac{\log 3,9}{\log 1,04213} \text{ mm}$$

$$A = \frac{0,59106}{0,01792} = 32,98 \cong \underline{\underline{33 \text{ mm}}}$$

Po zjištění polohy bodu označujícího spád mohu podobným způsobem pokračovat v určování hodnoty maximálního průtoku. Opět nejprve určím měřítko a následně hledaný průtok.

2) Průtok Q_{max} :

- první hodnota použitá k výpočtu měřítka osy průtoku: $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- druhá hodnota použitá k výpočtu měřítka osy průtoku: $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
- vzdálenost hodnot $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v diagramu: 55,5 mm
- B – vzdálenost hodnot $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – Q_{max} v diagramu: 59 mm

výpočet měřítka:

$$\log_z 10 - \log_z 1 = 55,5 \quad (4.3.3)$$

$$\log_z \frac{10}{1} = 55,5$$

$$\log_z 10 = 55,5$$

$$z^{55,5} = 10$$

$$z = \sqrt[55,5]{10}$$

$$z = \underline{1,04236}$$

výpočet průtoku $Q_{max.}$:

$$B = \log_z \frac{Q_{max.}}{1} \quad (4.3.4)$$

$$Q_{max.} = z^B$$

$$Q_{max.} = 1,04236^{59} \, m^3 \cdot s^{-1}$$

$$Q_{max.} = 11,562 \cong \underline{\underline{11,56 \, m^3 \cdot s^{-1}}}$$

Dále určím hodnotu minimálního průtoku. Jelikož budu odečítat ze stejné stupnice jako u průtoku minimálního, použiji hodnotu měřítka vypočtenou v předešlém kroku.

3) Průtok $Q_{min.}$:

- první hodnota použitá k výpočtu měřítka osy průtoku: $1 \, m^3 \cdot s^{-1}$
- druhá hodnota použitá k výpočtu měřítka osy průtoku: $10 \, m^3 \cdot s^{-1}$
- vzdálenost hodnot $1 \, m^3 \cdot s^{-1} - 10 \, m^3 \cdot s^{-1}$ v diagramu: 55,5 mm
- C – vzdálenost hodnot $1 \, m^3 \cdot s^{-1} - Q_{min.}$ v diagramu: 23,5 mm

výpočet průtoku $Q_{min.}$:

$$C = \log_z \frac{Q_{min.}}{1} \quad (4.3.5)$$

$$Q_{min.} = z^C$$

$$Q_{min.} = 1,04236^{23,5} \, m^3 \cdot s^{-1}$$

$$Q_{min.} = 2,651 \cong \underline{\underline{2,65 \, m^3 \cdot s^{-1}}}$$

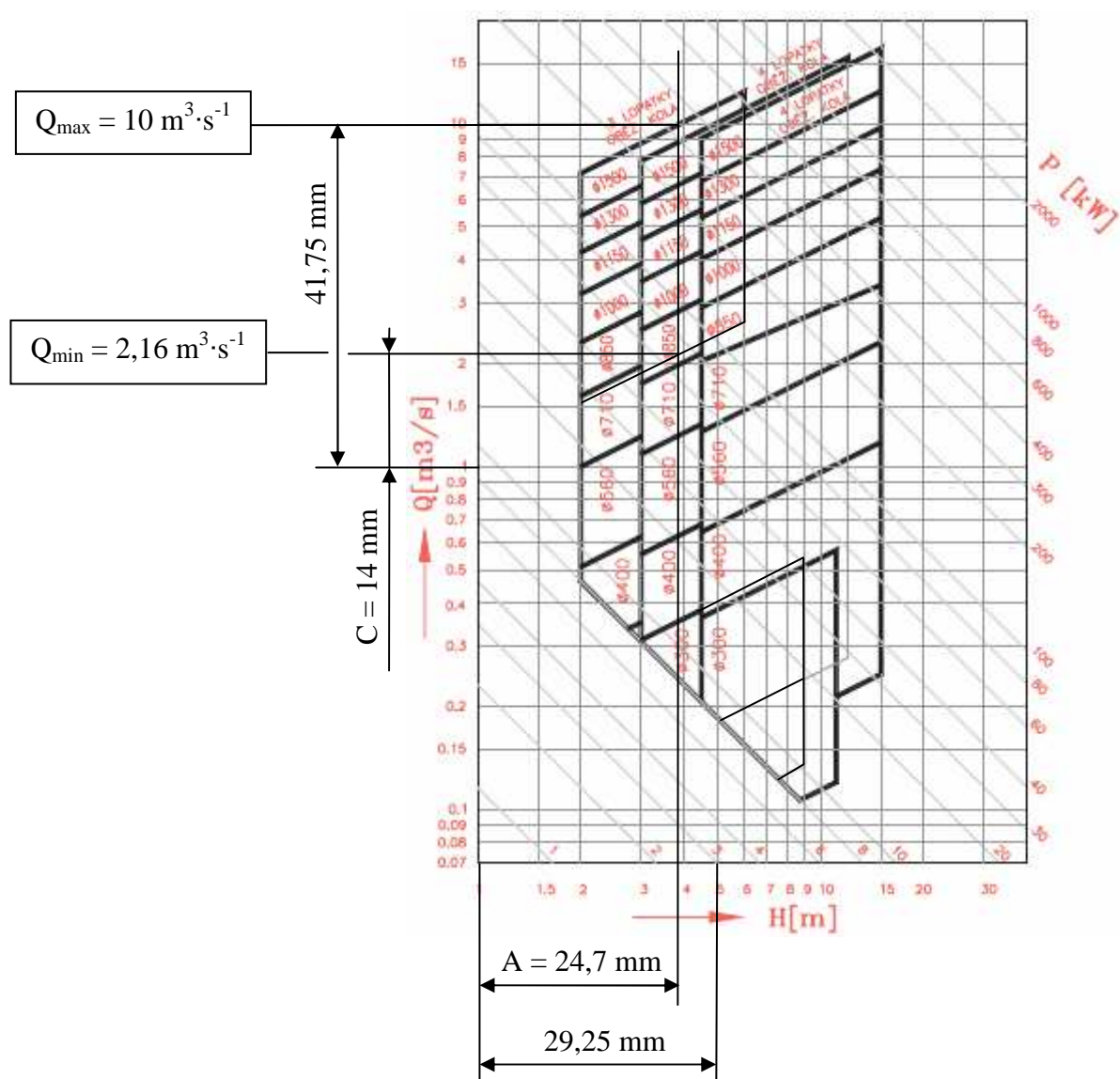
Stejný postup použiji při odečítání parametrů druhé turbíny.

Kaplanova turbína s radiálním rozváděčem (T-Kaplan)

- výrobce ČKD Turbo Technics, s.r.o.
- oběžné kolo: $\Phi 1500 \, \text{mm}$, 3 lopatky

- regulovatelné lopatky oběžného kola i rozváděcí lopatky
- lopatky rozváděcího kola z nerezového materiálu uloženy v samomazných pouzdrech
- lopatky oběžného kola odlity z nerezového materiálu odolného proti kavitaci
- hřídel uložena ve valivých ložiscích
- ovládání rozváděcího kola hydraulickým servomotorem
- ovládání oběžného kola hydraulicky, případně elektrickým servomotorem

Obr. 4.3.2 – Diagram Kaplanovy turbíny s radiálním rozváděčem

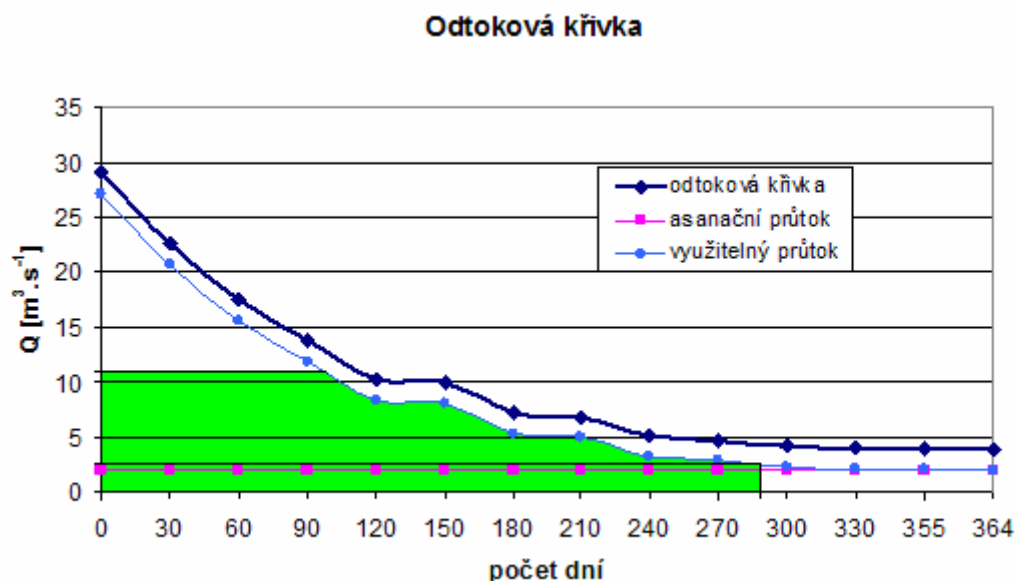


Pozn. Uvedené vzdálenosti [mm] a pozice jednotlivých bodů jsou opět, jako u předešlé turbíny, orientační. Jejich číselné hodnoty odpovídají skutečnosti. Originální diagram, ze kterého byly vzdálenosti odečítány je uveden jako příloha.

4.4 Výběr turbíny a jeho zdůvodnění

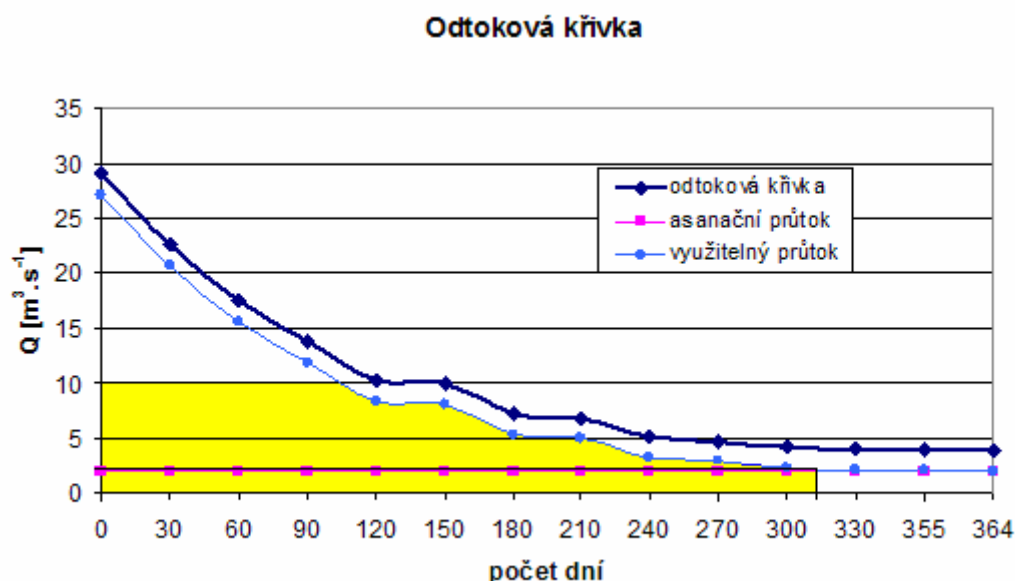
Pro výběr turbíny je rozhodující doba, po kterou je turbína schopna během roku pracovat a také hodnoty maximálního a minimálního průtoku, které dokáže využít. Z vypočtených minimálních průtoků, podle hodnot zaručených průtoků v jednotlivých ročních intervalech (odtoková křivka) a s respektováním asanačního průtoku jsem určil, že první uvažovaná turbína – **Kaplanova přímoproudá horizontální kolenová turbína (S-Kaplan)**, by byla schopna pracovat nejméně 270 dní. Druhá turbína - **Kaplanova turbína s radiálním rozváděčem (T-Kaplan)** by pracovala nejméně 300 dní. Přesný výpočtový minimální průtok byl v obou případech o něco vyšší a tudíž i doba provozu turbín. Uvedené hodnoty však byly v tabulce odtokové křivky nejbližší nižší a jsou tudíž zaručeny. Delší dobu provozu by tedy měla druhá turbína. Podle hodnot maximálních průtoků jsem však určil, že první turbína bude schopna pracovat s vyšším maximálním průtokem, a to po dobu větší, než 90 dní. Elektrická energie, kterou jsem schopen vyrobit pomocí přímoproudé turbíny v době průtoků vyšších, než $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (max. průtok horizontální turbínou s radiálním rozváděčem), je v mém případě rozhodujícím faktorem. Vybírám tedy **Kaplanovu přímoproudou horizontální kolenovou turbínu (S-Kaplan)**, průměr oběžného kola $\Phi = 1\,500 \text{ mm}$.

Obr. 4.4.1 – Využití hydropotenciálu při použití Kaplanovy přímoproudé horizontální kolenové turbíny (S-Kaplan)



- zelená plocha znázorňuje průtok využitý turbínou

Obr. 4.4.2 – Využití hydropotenciálu při použití Kaplanovy turbíny s radiálním rozváděčem (T-Kaplan)



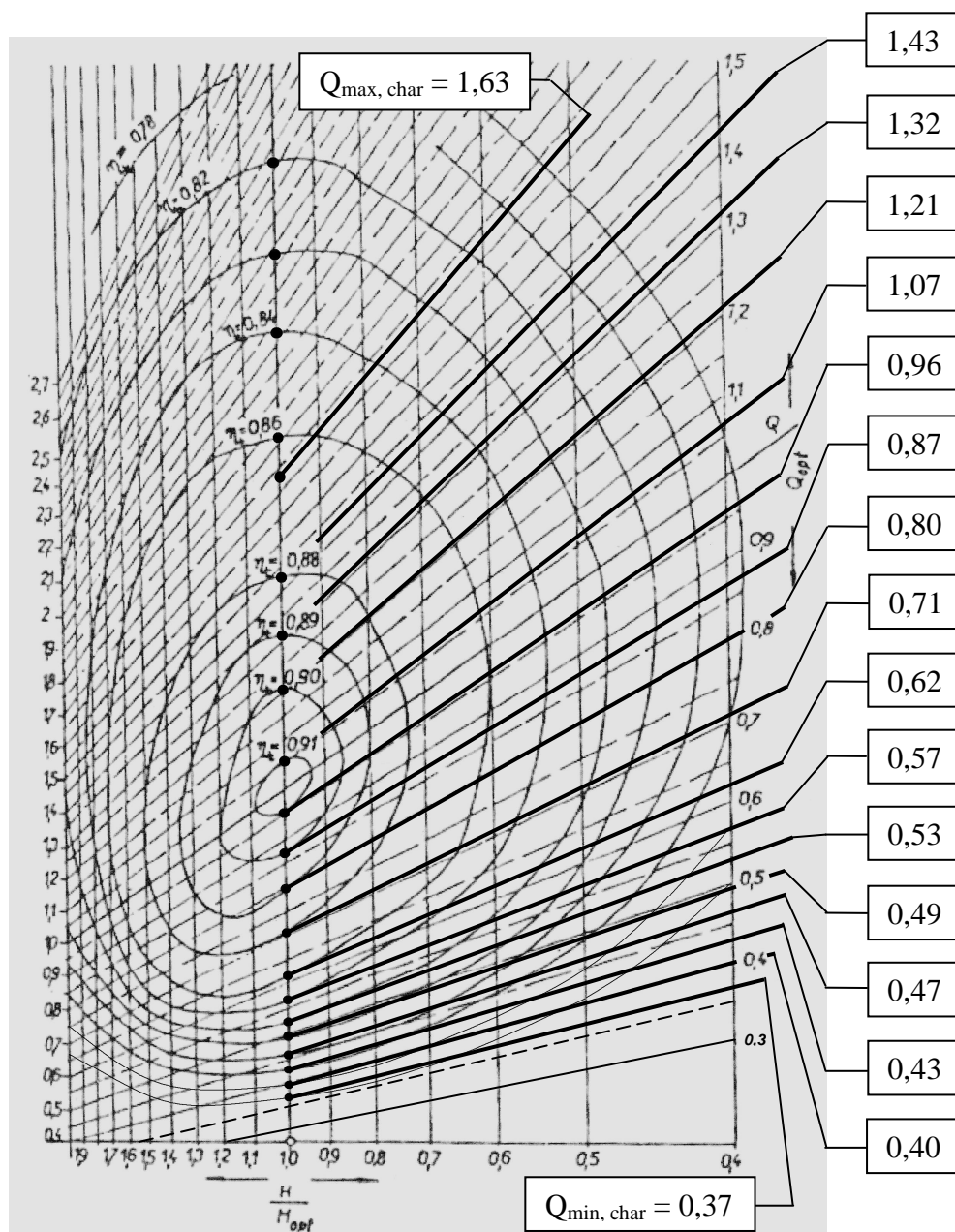
- žlutá plocha znázorňuje průtok využitý turbínou

4.5 Stanovení účinnosti zvolené turbíny

Dle vlastní zkušenosti mohu říci, že výrobci turbín neochotně poskytují bližší specifikace svých strojů. Jejich spolupráce se v mém případě omezila jen na zaslání propagačních materiálů dané firmy, v lepším případě diagramů použitelnosti turbín. Diagramy jsou vhodné pro volbu velikosti stroje, účinnostní charakteristiky se mi ovšem získat nepodařilo. Účinnost daného typu turbíny budu tedy zjišťovat z univerzální charakteristiky Kaplanovy turbíny jednotkových parametrů (spád $H = 1$ m, výkon $P = 1$ hp, Φ ob. kola = 1 m), kterou použiji z dostupné literatury.

Hodnoty účinnosti budu odečítat na čáře označující poměr spádů $H / H_{opt} = 1$. Jde o určité zjednodušení oproti skutečnosti, kdy spád samozřejmě nemá stále stejnou hodnotu. Pokud se mění spád, mění se významně i otáčky turbíny. Pro řešené podmínky je ovšem rozhodující regulovat turbínu tak, aby bylo dosaženo konstantních otáček a tím i konstantních otáček generátoru, které odpovídají parametrům sítě. Turbína bude regulována tak, aby byly výchyly spádu co možná nejmenší.

Obr. 4.5.1 – Univerzální charakteristika modelové Kaplanovy turbíny



Určení optimálního průtoku turbínou:

$$Q_{opt.} = \frac{Q_{max.} - Q_{min.}}{2} + Q_{min.} = \frac{11,56 - 2,65}{2} + 2,65 = \underline{7,105 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}} \quad (4.5.1)$$

Hodnota poměru průtoků $Q / Q_{opt.}$ v univerzální charakteristice při maximálním a minimálním průtoku turbínou:

$$Q_{max, char.} = \frac{Q_{max.}}{Q_{opt.}} = \frac{11,56}{7,105} = 1,627 \approx \underline{1,63} \quad (4.5.2)$$

$$Q_{\min, char.} = \frac{Q_{\min.}}{Q_{opt.}} = \frac{2,65}{7,105} = 0,373 \cong \underline{0,37} \quad (4.5.3)$$

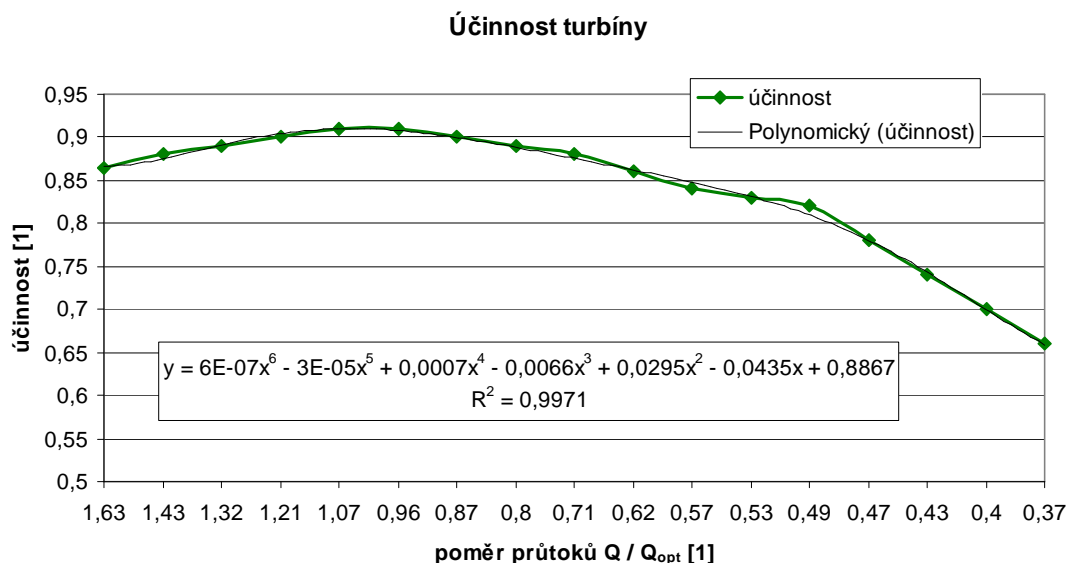
Tab. 4.5.1 – Tabulka hodnot účinnosti a odpovídajících poměrů průtoků $Q / Q_{opt.}$

$Q / Q_{opt.}$ [1]	Účinnost [1]	$Q / Q_{opt.}$ [1]	Účinnost [1]
1,63	0,865	0,62	0,86
1,43	0,88	0,57	0,84
1,32	0,89	0,53	0,83
1,21	0,90	0,49	0,82
1,07	0,91	0,47	0,78
0,96	0,91	0,43	0,74
0,87	0,90	0,40	0,70
0,80	0,89	0,37	0,66
0,71	0,88	arit. průměr	0,839

Pozn. Hodnoty účinnosti u poměrů průtoků 1,63; 0,43; 0,40; 0,37 byly v diagramu odhadnuty podle nejbližších okolních hodnot. Je velmi pravděpodobné, že by ve skutečnosti byla turbína při těchto průtokových poměrech odstavena, já však vycházím z diagramu použitelnosti a z vypočtených maximálních a minimálních průtoků turbínou, proto jsem tyto hodnoty do výpočtu zahrnul.

Účinnost turbíny jsem určil jako aritmetický průměr hodnot účinností odečtených při jednotlivých poměrech průtoků $Q / Q_{opt.}$:

$$\eta_t = \underline{0,839}$$

Obr. 4.5.2 – Graf závislosti účinnosti turbíny na poměru průtoků Q / Q_{opt} .

Pozn. Do grafu jsem přidal spojnici trendů, vyjadřující přibližně rovnici účinnosti turbíny. Tato polynomičká rovnice nejlépe vystihuje zjištěnou účinnostní křivku.

Jednotlivé účinnosti jsem odečítal z charakteristiky turbíny jednotkových parametrů, proto provedu tzv. přepočet v závislosti na změně rozměrů turbíny a spádu. Pro řešení s Kaplanovou turbínou se používá Huttonův přepočet. Hutton do vzorce zahrnul toto rozložení ztrát v turbíně: 70 % tvoří ztráty třením, 30 % ztráty kinetické, nezávislé na spádu a rozměru turbíny. Ztráty na česlích, v přivaděči a odpadu zanedbávám, jelikož přesné řešení těchto částí a jeho dopad na snížení celkové účinnosti MVE v této fázi není známo.

Huttonův přepočet:

$$\eta_s = 1 - (1 - \eta_m) \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \left(\frac{D_m \cdot (H_m)^{1/2}}{D_s \cdot (H_s)^{1/2}} \right)^{1/5} \right] \quad (4.5.4)$$

$$\eta_s = 1 - (1 - 0,839) \cdot \left[0,3 + 0,7 \cdot \left(\frac{1 \cdot (1)^{1/2}}{1,5 \cdot (3,9)^{1/2}} \right)^{1/5} \right] = \underline{\underline{0,861}}$$

kde η_s je skutečná účinnost, η_m modelová účinnost (odečtená z univerzální charakteristiky), H_m značí spád modelové turbíny, H_s spád skutečné turbíny, D_m průměr

oběžného kola modelové turbíny a D_s průměr oběžného kola skutečné turbíny. Hodnoty těchto veličin použité při přepočtu:

- $\eta_m = 0,839$ – účinnost odečtená z modelové charakteristiky, viz. Tab. 4.5.1,
- $H_m = 1$ m,
- $H_s = H_b = 3,9$ m – spád skutečné turbíny uvažuji stejný, jako hrubý spád, jelikož přesný vliv česlí, přivaděče a odpadu na snížení hodnoty spádu v této fázi není znám a je otázkou dalšího návrhu, H_b použiji i ve výpočtu výkonu MVE,
- $D_m = 1$ m,
- $D_s = 1,5$ m.

4.6 Výpočet instalovaného výkonu MVE

Návrhový průtok MVE bude roven maximálnímu průtoku turbínou:

$$Q_{využ.} = 11,56 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Skutečný výkon určím z rovnice (4.1.4):

$$P_s = \rho \cdot Q_{využ.} \cdot g \cdot H_b \cdot \eta_t \cdot \eta_p \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} \quad (4.6.1)$$

$$P_s = 999,941 \cdot 11,56 \cdot 9,81 \cdot 3,9 \cdot 0,861 \cdot 0,97 \cdot 0,88 \cdot 0,98 \cong \underline{318,529 \text{ kW}}$$

Hodnoty účinností použité ve výpočtu:

- $\eta_t = \eta_s = 0,861$ – účinnost turbíny po Huttonovu přepočtu, vzorec (4.5.4),
- $\eta_p = 0,97$ – účinnost převodu (ozubený) [5],
- $\eta_g = 0,88$ – účinnost generátoru [5],
- $\eta_{tr} = 0,98$ – účinnost transformace [2].

Instalovaný výkon elektrárny se podle postupu doporučeného v literatuře volí o 5 % nižší, než maximální využitelný výkon. Důvodem je prodloužení doby optimálního využití instalovaného výkonu.

Instalovaný výkon MVE:

$$P_{inst.} = P_s - \left(\frac{5}{100} \cdot P_s \right) = 318,529 - \left(\frac{5}{100} \cdot 318,529 \right) \cong \underline{\underline{302,603 \text{ kW}}} \quad (4.6.2)$$

4.7 Výpočet ročního množství vyrobené elektrické energie

Výpočet skutečného ročního množství vyrobené energie bude obdobný, jako u stanovení teoretického výkonu, který jsem na toku schopen využít a jemu odpovídající energie. Střední hodnotu průtoku v intervalu 0 – 30 dní odhaduji na $25,85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Opět provedu výpočet v jednotlivých ročních intervalech daných odtokovou křivkou.

Postup výpočtu

Ukázkový výpočet pro interval 90 – 120 dní:

Střední průtok:

$$Q_{stř.} = \frac{Q_{90} + Q_{120}}{2} = \frac{13,8 + 10,3}{2} = \underline{12,05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}} \quad (4.7.1)$$

Využitelný průtok:

$$Q_{využ.} = Q_{stř.} - Q_{asan.} = 12,05 - 1,89 = \underline{10,16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}} \quad (4.7.2)$$

Skutečný výkon:

$$P_s = \rho \cdot Q_{využ.} \cdot g \cdot H_b \cdot \eta_t \cdot \eta_p \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} \\ P_s = 999,941 \cdot 10,16 \cdot 9,81 \cdot 3,9 \cdot 0,861 \cdot 0,97 \cdot 0,88 \cdot 0,98 \cong \underline{279,953 \text{ kW}} \quad (4.7.3)$$

Doba provozu:

$$\tau = \text{dny} \cdot \text{hodiny} = 30 \cdot 24 = \underline{720 \text{ hod.}} \quad (4.7.4)$$

Vyrobená energie:

$$E_{skut.} = P_s \cdot \tau = 279,953 \cdot 720 = \underline{\underline{201\,566,256 \text{ kWh}}} \quad (4.7.5)$$

Tab. 4.7.1 – Tabulka výpočtů skutečného výkonu a vyrobené energie

Počet dní (interval)	Doba provozu τ [hod.]	$Q_{\text{stř.}}$ [m ³ /s]	$Q_{\text{asan.}}$ [m ³ /s]	$Q_{\text{využ.}}$ [m ³ /s]	η_t [1]	P_s [kW]	$E_{\text{skut.}}$ [kWh]
0 – 30	672	25,85	1,89	11,56	0,861	318,529	214 051,724
30 – 60	720	20,05	1,89	11,56	0,861	318,529	229 341,133
60 – 90	720	15,65	1,89	11,56	0,861	318,529	229 341,133
90 – 120	720	12,05	1,89	10,16	0,861	279,953	201 566,256
120 – 150	720	10,095	1,89	8,205	0,861	226,084	162 780,623
150 – 180	720	8,545	1,89	6,655	0,861	183,375	132 029,865
180 – 210	720	7	1,89	5,11	0,861	140,803	101 378,304
210 – 240	720	5,95	1,89	4,06	0,861	111,871	80 547,145
240 – 270	720	4,9	1,89	3,01	0,861	82,939	59 715,987
270 – 300	504	4,4	1,89	2,65	0,861	73,019	36 801,713
300 – 330	0	4,05	1,89	0	0	0	0
330 – 355	0	3,95	1,89	0	0	0	0
355 – 364	0	3,85	1,89	0	0	0	0
Σ / rok						2 053,633	1 447 553,884

V prvních třech intervalech Tabulky 4.7.1 bude hodnota výkonu rovna instalovanému výkonu MVE. Kvůli dalšímu přiblížení výpočtu reálným podmínkám budu brát v úvahu to, že elektrárna bude v době maximálních průtoků 2 dny mimo provoz. Počet hodin a hodnota vyrobené energie je proto v prvním intervalu nižší, než ve druhém intervalu. Dle odtokové křivky je zaručen dostatečný průtok pro provoz elektrárny 270 dní v roce. Turbína však bude fungovat ještě o několik dní déle a to proto, že minimální hodnota průtoku turbínou leží níže, než využitelný průtok $3,01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Za 30 dní klesne průtok o $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na hodnotu $2,51 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Počet dní, za který klesne průtok z hodnoty $3,01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ o $0,36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na konečných $2,65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (minimální průtok turbínou) je hledaný počet provozních dní v intervalu 270 – 300 dní. Pro zjednodušení považuji pokles odtokové křivky v tomto intervalu za konstantní.

Počet dní, který bude elektrárna v provozu v intervalu 270 – 300 dní:

$$dny = \frac{30 \cdot 0,36}{0,5} = 21,6 \cong \underline{21 \text{ dní (504 hod.)}} \quad (4.7.6)$$

Potom průtok klesne natolik, že elektrárna bude odstavena. Celkové množství vyrobené elektrické energie dostanu sečtením energií vyrobených v jednotlivých intervalech.

Množství elektrické energie vyrobené za rok:

$$\Sigma E_{\text{int.}} = 1\,447\,553,884 \text{ kWh} \cong \underline{1\,447,554 \text{ MWh}} \quad (4.7.7)$$

Provozní roční využití MVE budu uvažovat ve výši 98 %:

$$E_{\text{skut.}} = \Sigma E_{\text{int.}} \cdot 0,98 = 1\,447,554 \cdot 0,98 \cong \underline{\underline{1\,418,603 \text{ MWh}}} \quad (4.7.8)$$

5 Návratnost investic

5.1 Koeficient ročního využití instalovaného výkonu MVE

Teoreticky vyrobená elektrická energie za rok:

$$E_{\text{teor.}} = P_{\text{inst.}} \cdot 8\,760 = 302,603 \cdot 8\,760 \cong \underline{2\,650\,802,28 \text{ kWh}} \quad (5.1.1)$$

Koeficient ročního využití instalovaného výkonu:

$$k_v = \frac{E_{\text{skut.}}}{E_{\text{teor.}}} = \frac{1\,418\,603}{2\,650\,802,28} \cong \underline{\underline{0,535}} \quad (5.1.2)$$

5.2 Náklady na výstavbu MVE

Náklady na výstavbu MVE se skládají z mnoha položek. Jejich výpočet a určení není součástí mé práce. Z tohoto důvodu budu pro orientační stanovení doby návratnosti investic uvažovat jako náklady na výstavbu MVE limitní investiční náklady dle vyhlášky 475/2005 Sb. – Vyhláška, kterou se provádějí některá ustanovení zákona o podpoře využívání obnovitelných zdrojů.

Tab. 5.2.1 Měrné investiční náklady a roční využití $P_{inst.}$ zdroje

Celkové měrné investiční náklady (limitní) [Kč·kW _e ⁻¹]	Roční využití instalovaného výkonu [kWh·kW _e ⁻¹]
90 000	> 3 700
110 000	> 4 500
130 000	> 5 000

Roční využití instalovaného výkonu:

$$Využití P_{inst.} = k_v \cdot 8\,760 = 0,535 \cdot 8\,760 = \underline{4\,686,6 \text{ kWh} \cdot \text{kW}_e^{-1}} \quad (5.2.1)$$

Roční využití instalovaného výkonu bude vyšší, než 4 500 [kWh·kW_e⁻¹], celkové měrné investiční náklady budou tedy dle Tabulky 5.2.1 = **110 000 Kč·kW_e⁻¹**.

Celkové investiční náklady:

$$\begin{aligned} \text{Náklady} &= \text{Invest. náklady na kW}_e \cdot P_{inst.} \\ \text{Náklady} &= 110\,000 \cdot 302,603 = \underline{33\,286\,330 \text{ Kč}} \end{aligned} \quad (5.2.2)$$

5.3 Stanovení doby návratnosti investic

Dobu návratnosti určím jako poměr celkových investičních nákladů na realizaci MVE a ročních financí získaných za výrobu elektřiny. Výkupní cena elektřiny pro MVE dle Cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 8/2008 ze dne 18. listopadu 2008 [14] je **2 700 Kč·MWh⁻¹**.

Roční zisk:

$$Zisk_{rok} = \text{Výkup. cena} \cdot E_{skut} = 2\,700 \cdot 1\,418,603 = \underline{3\,830\,228,1 \text{ Kč}} \quad (5.3.1)$$

Návratnost:

$$\text{Návratnost} = \frac{\text{Náklady}}{Zisk_{rok}} = \frac{33\,286\,330}{3\,830\,228,1} \cong \underline{\underline{8,69 \text{ let}}} \quad (5.3.2)$$

5.4 Dotace [15]

Finanční podporu na výstavbu MVE lze získat dvěma způsoby. Prvním je dotace a druhým je půjčka. Finanční podporu lze žádat od Státního fondu životního prostředí nebo také z evropských strukturálních fondů. Tuto možnost bych ale vzhledem k nejistému výsledku a značné byrokratické náročnosti podávání žádostí a jejich posuzování vyloučil. Podle serveru <http://www.svn.cz/> jsou možné tyto formy podpory:

- Česká energetická agentura (ČEA) - Část A Státního programu na podporu OZE a úspor energie (dotace až 30 % celkové investice, maximálně však 3 mil. Kč na jednu akci),
- Státní fond životního prostředí (SFŽP) - Část B Státního programu na podporu OZE a úspor energie (Příloha II - Směrnice o poskytování podpor ze SFŽP, bod 5a, kategorie P, zde je možná pouze podpora formou půjčky až do výše 35 % z rozpočtových nákladů, úrok 1,5 % nad referenční sazbu, doba splatnosti 12 let),
- Operační program Průmysl a podnikání (Podprogram obnovitelné zdroje, dotace může činit až 46 % uznatelných nákladů).

Možná je také půjčka od některé z bank. Získání dotace nebo půjčky může významně pomoci investorovi při výstavbě MVE. Všechny žádosti jsou ovšem posuzovány individuálně a není zaručena výše finanční podpory, která bude na realizaci díla přiznána. Z tohoto důvodu jsem při stanovení doby návratnosti případné dotace a půjčky neuvažoval.

6 Závěr

V teoretické části bakalářské práce jsem popsal způsoby a podmínky výroby elektrické energie v malých vodních elektrárnách. Provedl jsem rozdělení vodních elektráren podle různých kritérií, uvedl základní části MVE a jejich funkci. Popsal jsem princip, na jakém pracují nejvíce používané typy vodních turbín a také hydrologické podmínky, ve kterých se používají. Dále jsem uvedl rozdělení vodních turbín do rozličných kategorií. Některé pojmy z těchto rozdělení byly totiž použity v dalším textu. Práce dále obsahuje postup výpočtu využitelného výkonu hydrologického zdroje.

V druhé části práce jsem dle popsaného postupu vybral dvě turbíny, které svými parametry nejvíce vyhovují zadaným podmínkám. Z těchto turbín jsem pak zvolil pro strojní část MVE turbínu, která dokáže nejlépe využít poskytovaný průtok. Z důvodu omezeného přístupu k podrobným specifikacím turbín jsem stroj vybíral na základě získaných diagramů použitelnosti. Jelikož jsem pro výpočet výkonu neměl k dispozici přesnou hodnotu účinnosti, stanovil jsem ji z univerzální charakteristiky turbíny jednotkových parametrů a následně přepočítal na parametry skutečné turbíny. Určil jsem instalovaný výkon elektrárny $P_{inst.} = 302,603 \text{ kW}$. Náklady na výstavbu MVE byly orientačně určeny na základě hodnoty ročního využití instalovaného výkonu a velikosti instalovaného výkonu a dosáhly výše 33 286 330 Kč. Dle roční hodnoty vyrobené elektrické energie a aktuální výkupní ceny elektrické energie pro MVE jsem vypočetl roční zisk plynoucí z provozování elektrárny $Zisk_{rok} = 3\,830\,228,1 \text{ Kč}$. Na závěr jsem stanovil orientační dobu návratnosti investic na výstavbu zamýšlené MVE, která bude 8,69 let.

Stanovenou dobu návratnosti hodnotím jako relativně krátkou a tudíž výstavbu řešené MVE doporučuji. Pro přesné stanovení doby návratnosti by však bylo třeba znát celkové technické řešení MVE včetně vtokového objektu, česlí, přivaděče, odpadního kanálu a také ceny jednotlivých položek nákladů. Uvedená doba návratnosti je pouze orientační. Výpočty byly prováděny v programu Microsoft Excel a také ručně pomocí kalkulatoru.

7 Použité zdroje

- [1] PAŽOUT, František. *Malé vodní elektrárny 1 – ekonomika a předpisy*. Praha: SNTL, 1990. 504 s.
- [2] BEDNÁŘ, Josef. *Malé vodní elektrárny 2 – turbíny*. Praha: SNTL, 1989. 240s.
- [3] HOLATA, Miroslav. *Malé vodní elektrárny projektování a provoz*. Praha: Academia, 2002. 272 s. ISBN 80-200-0828-4.
- [4] VILEM, Ján. *Projektovanie vodných elektrární*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2001. 223 s. ISBN 80-227-1468-2.

- [5] VŠB – TU Ostrava, FEI, Katedra elektroenergetiky: *článek Vodní elektrárny*.
- [6] GABRIEL, Pavel, ČIHÁK, František, KALANDRA, Petr. *Malé vodní elektrárny*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. 312 s. ISBN 80-01-01812-1.
- [7] VRTEK, Mojmir. *Materiály k předmětu Alternativní a obnovitelné zdroje energie 1*.
- [8] Firemní literatura ČKD Turbo Technics, s.r.o.
- [9] Firemní literatura Hydrohrom, spol. s r.o.
- [10] Firemní literatura Mavel, a.s.
- [11] LAIKA, Viktor. *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. 2001, 01/22/2009 [cit. 2008-11-25]. Dostupný z WWW: <<http://mve.energetika.cz/>>.
- [12] *Internetové energetické konsultační a informační středisko ČEA: Energie vody* [online]. c2001-2008 [cit. 2008-11-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.i-ekis.cz/?page=voda>>.
- [13] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Coriolisova síla* [online]. c2009 [cit. 2009-04-26]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Coriolisova_s%C3%ADla&oldid=3889395>.
- [14] FIŘT, Josef. *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 8/2008* [online]. c2007-2009, 05. 05. 2009 [cit. 2009-03-27]. Dostupný z WWW: <http://www.eru.cz/user_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/OZ/CR_8-2008_OZE-KVET-DZ.pdf>.
- [15] *SEVEN, o.p.s. - Středisko pro efektivní využívání energie* [online]. c2007 [cit. 2009-03-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.svn.cz/>>.

8 Přílohy

Příloha č. 1 Diagram použitelnosti Kaplanovy přímoproudé horizontální kolenové turbíny (S-Kaplan) v originální velikosti.

Příloha č. 2 Diagram použitelnosti Kaplanovy turbíny s radiálním rozváděčem (T-Kaplan) v originální velikosti.

Příloha č. 3 CD-ROM obsahující:

- text bakalářské práce (Bakalářská práce.doc, Microsoft Word 2003),
- text bakalářské práce (Bakalářská práce.pdf),
- tabulky + výpočty (Bakalářská práce - tabulky + výpočty.xls, Microsoft Excel 2003),
- originální diagramy turbín ČKD Turbo Technics, s.r.o. (ČKD Turbo Technics, s.r.o. - Diagramy turbín.pdf)